

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mario Barunica

Zagreb, 2015.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Doc. dr. sc. Damir Godec, dipl. ing.

Student:

Mario Barunica

Zagreb, 2015.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem svom mentoru doc. dr. sc. Damiru Godecu na stručnom vođenju kroz izradu diplomskog rada te na pruženoj pomoći i korisnim savjetima za oblikovanje rada.

Također zahvaljujem svima s Katedre za preradbu polimera i drva, a posebno mr. sc. Maji Rujnić-Sokele te Božidaru Bušetinčan na pomoći i korisnim savjetima tijekom izrade eksperimentalnog dijela rada.

Konačno, zahvaljujem svojoj obitelji i svojoj djevojci na potpori i razumijevanju u razdoblju izrade diplomskog rada, kao i na potpori tijekom samog studiranja.

Mario Barunica



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo
materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Mario Barunica**

Mat. br.: 0035170024

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **ANALIZA UTJECAJA PARAMETARA INJEKCIJSKOG PREŠANJA NA MEHANIČKA SVOJSTVA LINIJE SPAJANJA**

Naslov rada na engleskom jeziku: **ANALYSIS OF INFLUENCE OF INJECTION MOULDING PARAMETERS ON WELDED LINE MECHANICAL PROPERTIES**

Opis zadatka:

Injekcijsko prešanje najvažniji je postupak prerade polimera. Jedan od razloga za to je činjenica, da se tim postupkom mogu proizvoditi otpresci različitih veličina i kompliciranosti geometrije. Pri injekcijskom prešanju otpresaka komplicirane geometrije, vrlo često nije moguće izbjeći pojavu tzv. linije spajanja na mjestima gdje se sastaju dva čela taljevine u fazi punjenja kalupne šupljine. Ista pojava je prisutna pri injekcijskom prešanju većih otpresaka, kada se u jednoj kalupnoj šupljini primjenjuje dva ili više ušća, kako bi se osiguralo potpuno popunjavanje kalupne šupljine.

Kako linije spajanja u otpresku predstavljaju izvjesni diskontinuitet u strukturi materijala, u cilju proizvodnje kvalitetnih otpresaka, potrebno je poznavati svojstva otpresaka na mjestu linija spajanja. Najveći utjecaj na svojstva linije spajanja, osim položaja i broja ušća u kalupu, imaju parametri prerade injekcijskim prešanjem. Stoga je u okviru rada potrebno načiniti pregled dostupne literature koja obrađuje utjecaj pojedinih parametara injekcijskog prešanja na svojstva polimernih otpresaka. Na temelju dosadašnjih spoznaja o tim utjecajima, potrebno je izabrati odgovarajući plan pokusa te na standardiziranim ispitnim tijelima provesti analizu utjecaja pojedinih signifikantnih parametara injekcijskog prešanja na rasteznu čvrstoću linije spajanja.

Zadatak zadan:
13. studenog 2014.


Rok predaje rada:
15. siječnja 2015.

Predviđeni datum obrane:
21., 22. i 23. siječnja 2015.

Zadatak zadao:


Doc. dr. sc. Damir Godec

Predsjednik Povjerenstva:


Prof. dr. sc. Franjo Cajner

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	IV
POPIS TABLICA.....	VI
POPIS OZNAKA	VII
POPIS KRATICA	IX
SAŽETAK.....	X
SUMMARY	XI
1. UVOD	1
2. INJEKCIJSKO PREŠANJE.....	2
2.1. DEFINICIJA I POSTUPCI INJEKCIJSKOG PREŠANJA	2
2.2. LINIJA ZA INJEKCIJSKO PREŠANJE	3
2.3. INJEKCIJSKO PREŠANJE PLASTOMERNIH TALJEVINA.....	3
2.4. NAJVAŽNIJI PARAMETRI PROCESA INJEKCIJSKOG PREŠANJA	6
2.4.1. TLAK UBRIZGAVANJA	6
2.4.2. HIDRAULIČKI TLAK U JEDINICI ZA UBRIZGAVANJE.....	7
2.4.3. TLAK U KALUPNOJ ŠUPLJINI.....	8
2.4.4. PREKLAPANJE NA NAKNADNI TLAK	10
2.4.5. NAKNADNI TLAK (NAKNADNI TLAK U KALUPNOJ ŠUPLJINI)	10
2.4.6. TEMPERATURA TALJEVINE	11
2.4.7. TEMPERATURA STIJENKE KALUPNE ŠUPLJINE	12
2.4.8. TEMPERATURA MEDIJA ZA TEMPERIRANJE.....	14
2.4.9. BRZINA (PROTOK) MEDIJA ZA TEMPERIRANJE.....	15
2.4.10. BRZINA UBRIZGAVANJA (VRIJEME UBRIZGAVANJA).....	15
2.4.11. VRIJEME DJELOVANJA NAKNADNOG TLAKA	16
2.4.12. VRIJEME HLAĐENJA OTPRESKA	17
2.4.13. VRIJEME CIKLUSA INJEKCIJSKOG PREŠANJA.....	18
2.5. UTJECAJ PARAMETARA INJEKCIJSKOG PREŠANJA NA SVOJSTVA OTPRESKA	18
2.6. DIMENZIJSKA STABILNOST OTPRESKA.....	20
3. KALUP	21
3.1. ULAZI U KALUP	22
3.2. NORMA ISO 294 – 1: 1996.....	23
3.2.1. ISO KALUPI (S VIŠE KALUPNIH ŠUPLJINA)	24
3.3. TEMELJNE FAZE KONSTRUIRANJA KALUPA.....	28
3.4. TOLERANCIJE KALUPA	28

3.5.	DODATCI KALUPU	29
3.6.	POSTUPCI PROIZVODNJE KALUPA	29
4.	ISPITNO TIJELO	31
4.1.	PRIPREMA ISPITNIH TIJELA	31
4.2.	NORMA ISO 527 – 2: 1993	31
5.	POSTUPCI ISPITIVANJA MEHANIČKIH SVOJSTAVA	34
5.1.	MEHANIČKA SVOJSTVA OTPRESKA	34
5.2.	POSTUPCI ISPITIVANJA	37
5.2.1.	KRA TKOTRAJNA MEHANIČKA ISPITIVANJA	38
5.2.2.	DUGOTRAJNA MEHANIČKA ISPITIVANJA	42
6.	EKSPERIMENTALNI DIO	45
6.1.	CILJ ISTRAŽIVANJA	45
6.2.	ISPITNI MATERIJAL I OPREMA	45
6.3.	FAKTORSKI PLAN POKUSA	50
6.4.	CENTRALNO-KOMPOZITNI PLAN POKUSA	51
6.5.	PRETPOKUS – ODREĐIVANJE MAKSIMALNOG VREMENA TRAJANJA NAKNADNOG TLAKA	55
6.5.1.	PROVEDBA PRETPOKUSA – ODREĐIVANJE MAKSIMALNOG VREMENA TRAJANJA NAKNADNOG TLAKA	55
6.5.2.	REZULTATI PRETPOKUSA – ODREĐIVANJE MAKSIMALNOG VREMENA TRAJANJA NAKNADNOG TLAKA	55
6.6.	PRETPOKUS – ODREĐIVANJE NAJUTJECAJNIJIH PARAMETARA INJEKCIJSKOG PREŠANJA NA RASTEZNU ČVRSTOĆU LINIJE SPAJANJA ISPITNIH TIJELA	56
6.6.1.	PROVEDBA PRETPOKUSA – ODREĐIVANJE NAJUTJECAJNIJIH PARAMETARA INJEKCIJSKOG PREŠANJA NA RASTEZNU ČVRSTOĆU LINIJE SPAJANJA ISPITNIH TIJELA	56
6.6.2.	REZULTATI PRETPOKUSA – ODREĐIVANJE NAJUTJECAJNIJIH PARAMETARA INJEKCIJSKOG PREŠANJA NA RASTEZNU ČVRSTOĆU LINIJE SPAJANJA ISPITNIH TIJELA	57
6.6.3.	ANALIZA PRETPOKUSA – ODREĐIVANJE NAJUTJECAJNIJIH PARAMETARA INJEKCIJSKOG PREŠANJA NA RASTEZNU ČVRSTOĆU LINIJE SPAJANJA ISPITNIH TIJELA	59
6.7.	POKUS – UTJECAJ TEMPERATURE TALJEVINE I VREMENA NAKNADNOG TLAKA NA RASTEZNU ČVRSTOĆU LINIJE SPAJANJA ISPITNIH TIJELA	60
6.7.1.	PROVEDBA POKUSA – UTJECAJ TEMPERATURE TALJEVINE I VREMENA NAKNADNOG TLAKA NA RASTEZNU ČVRSTOĆU LINIJE SPAJANJA ISPITNIH TIJELA	61
6.7.2.	REZULTATI POKUSA – UTJECAJ TEMPERATURE TALJEVINE I VREMENA NAKNADNOG TLAKA NA RASTEZNU ČVRSTOĆU LINIJE SPAJANJA ISPITNIH TIJELA	61

6.7.3.	ANALIZA POKUSA – UTJECAJ TEMPERATURE TALJEVINE I VREMENA NAKNADNOG TLAKA NA RASTEZNU ČVRSTOĆU LINIJE SPAJANJA ISPITNIH TIJELA	63
6.8.	RASPRAVA O DOBIVENIM REZULTATIMA.....	64
7.	ZAKLJUČAK	66
8.	LITERATURA	67
9.	PRILOZI	69

POPIS SLIKA

Slika 2.1. Modelni prikaz sustava za injekcijsko prešanje plastomernih taljevina	4
Slika 2.2. Sustav za injekcijsko prešanje pločastog otpreska	5
Slika 2.3. Informacije koje je moguće prikupiti bilježenjem tlakova u hidrauličkom sustavu i kalupnoj šupljini	8
Slika 2.4. Utjecaj faza tijeka tlaka u kalupnoj šupljini na otpresak	9
Slika 2.5. Korelacija između naknadnog tlaka u hidrauličkom sustavu ubrizgavalice i u kalupnoj šupljini	11
Slika 2.6. Utjecaj temperature taljevine na tijek tlaka u hidrauličkom sustavu ubrizgavalice i kalupnoj šupljini	12
Slika 2.7. Temperaturno polje u kalupu	13
Slika 2.8. Utjecaj temperature stijenke kalupne šupljine na tijek tlaka u hidrauličkom sustavu ubrizgavalice i tlaka u kalupnoj šupljini	14
Slika 2.9. Temperaturni gradijent kroz stijenku kalupa: a) pri laminarnom strujanju, b) pri turbulentnom strujanju	15
Slika 2.10. Određivanje optimalnog vremena djelovanja naknadnog tlaka	16
Slika 2.11. Analiza ciklusa injekcijskog prešanja	17
Slika 2.12. Kvaliteta otpreska u ovisnosti o parametrima preradbe	19
Slika 3.1. Shematski dijagram ciklusa injekcijskog prešanja	24
Slika 3.2. Kalupna ploča za ISO kalup tipa A	25
Slika 3.3. Kalupna ploča za ISO kalup tipa B	25
Slika 3.4. Različite konfiguracije umetaka	27
Slika 3.5. Temeljne faze konstruiranja kalupa za injekcijsko prešanje	28
Slika 4.1. Oblik ispitnog tijela	31
Slika 4.2. Specijalni oblik ispitnog tijela	33
Slika 5.1. Napetosti u pločastom otpresku	35
Slika 5.2. Karakteristični dijagrami rastezno naprezanje-istezanje osnovnih skupina polimernih materijala	39
Slika 5.3. Raščlanjeni dijagram rastezno naprezanje-istezanje kristalastih plastomera	39
Slika 5.4. Vrste opterećenja tijela	40
Slika 5.5. Opći dijagram naprezanje-deformacija	40
Slika 5.6. Vrste krivulja pri ispitivanju rastezanjem	41
Slika 5.7. Postupak određivanja modula elastičnosti polimernih materijala	42
Slika 5.8. Temeljni prikaz ponašanja polimernih materijala pri dugotrajnom statičkom opterećenju (krivulje puzanja i relaksacije polimernih materijala)	43
Slika 5.9. Prikaz ponašanja polimernih materijala pri dinamičkom opterećenju	43
Slika 5.10. Izokroni dijagram naprezanje-istezanje	44
Slika 6.1. Normirano ispitno tijelo	45
Slika 6.2. Polipropilen (PP)	46
Slika 6.3. Temperiralo proizvođača <i>Regloplas</i>	46
Slika 6.4. Ubrižgavalica proizvođača <i>Arburg</i> , model <i>Allrounder 305-210-700</i>	47
Slika 6.5. Digitalna pomična mjerka proizvođača <i>Micromaster</i>	48
Slika 6.6. Digitalna vaga proizvođača <i>A&D</i>	48
Slika 6.7. Pomični dio kalupa	49
Slika 6.8. Nepomični dio kalupa	49
Slika 6.9. Univerzalna kidalica proizvođača <i>WPM</i>	50
Slika 6.10. Centralno-kompozitni plan pokusa s 3 faktora	52
Slika 6.11. Potpuni faktorski plan pokusa 3^k	53
Slika 6.12. Centralno-kompozitni plan pokusa s 2 faktora	53
Slika 6.13. Rezultati pretpokusa - određivanje maksimalnog vremena trajanja naknadnog tlaka	56

Slika 6.14. Ispitivanje rastezne čvrstoće linije spajanja na univerzalnoj kidalici	57
Slika 6.15. Ovisnost rastezne čvrstoće o temperaturi taljevine i vremenu naknadnog tlaka u pretpokusu	60
Slika 6.16. Ovisnost rastezne čvrstoće o temperaturi taljevine i vremenu naknadnog tlaka u pokusu	64

POPIS TABLICA

Tablica 2.1. Utjecaj parametara injekcijskog prešanja na izmjere otpreska	20
Tablica 3.1. Dodatci kalupu	29
Tablica 4.1. Dimenzije ispitnog tijela 1A i 1B	32
Tablica 4.2. Dimenzije ispitnog tijela 1BA i 1BB	32
Tablica 4.3. Dimenzije ispitnog tijela 5A i 5B	33
Tablica 5.1. Utjecaj temperature stijenke kalupne šupljine na neka svojstva otpreska	37
Tablica 5.2. Pregled mehaničkih svojstava	38
Tablica 6.1. Svojstva polipropilena	46
Tablica 6.2. Tehničke karakteristike ubrizgavalice <i>Arburg</i> , model <i>Allrounder 305-210-700</i>	47
Tablica 6.3. Vrijednosti osne udaljenosti α	54
Tablica 6.4. Konstantni parametri preradbe pretpokusa – određivanje maksimalnog vremena trajanja naknadnog tlaka	55
Tablica 6.5. Konstantni parametri preradbe pretpokusa - određivanje najutjecajnijih parametara injekcijskog prešanja na rasteznu čvrstoću linije spajanja ispitnih tijela	57
Tablica 6.6. Rezultati pretpokusa - određivanje najutjecajnijih parametara injekcijskog prešanja na rasteznu čvrstoću linije spajanja ispitnih tijela - srednje i izračunate vrijednosti	58
Tablica 6.7. Rezultati analize varijance - utjecaj parametara na rasteznu čvrstoću u pretpokusu	59
Tablica 6.8. Pregled statističkih podataka o modelu - utjecaj parametara na rasteznu čvrstoću u pretpokusu	59
Tablica 6.9. Konstantni parametri preradbe pokusa - utjecaj temperature taljevine i vremena naknadnog tlaka na rasteznu čvrstoću linije spajanja ispitnih tijela	61
Tablica 6.10. Rezultati pokusa - utjecaj temperature taljevine i vremena naknadnog tlaka na rasteznu čvrstoću linije spajanja ispitnih tijela - srednje i izračunate vrijednosti	62
Tablica 6.11. Rezultati analize varijance - utjecaj parametara na rasteznu čvrstoću u pokusu	63
Tablica 6.12. Pregled statističkih podataka o modelu - utjecaj parametara na rasteznu čvrstoću u pokusu	63
Tablica 9.1. Rezultati pretpokusa - određivanje maksimalnog vremena trajanja naknadnog tlaka	69
Tablica 9.2. Rezultati pretpokusa - određivanje najutjecajnijih parametara injekcijskog prešanja na rasteznu čvrstoću linije spajanja ispitnih tijela - I. dio	70
Tablica 9.3. Rezultati pretpokusa - određivanje najutjecajnijih parametara injekcijskog prešanja na rasteznu čvrstoću linije spajanja ispitnih tijela - II. dio	71
Tablica 9.4. Rezultati pokusa - utjecaj temperature taljevine i vremena naknadnog tlaka na rasteznu čvrstoću linije spajanja ispitnih tijela - I. dio	72
Tablica 9.5. Rezultati pokusa - utjecaj temperature taljevine i vremena naknadnog tlaka na rasteznu čvrstoću linije spajanja ispitnih tijela - II. dio	73

POPIS OZNAKA

<u>Oznaka</u>	<u>Jedinica</u>	<u>Opis</u>
A	mm ²	površina
A ₀	mm ²	početna ploština presjeka epruvete
a	-	toplinska difuznost
a _{ef}	m ² /s	efektivna toplinska difuznost
b	mm	širina
b ₁	mm	širina uskog dijela
b ₂	mm	širina pri kraju
E	N/mm ²	modul elastičnosti
E _p	N/mm ²	modul pritiskosti
E _r	N/mm ²	rastezni modul elastičnosti
F	N	sila
F _s	-	broj faktorskih stanja
F _m	N	maksimalna sila
F _p	N	prekidna sila
F _r	N	sila na granici razvlačenja
G	N/mm ²	modul smičnosti
h	mm	visina
H ₀	-	rizik odbacivanja hipoteze
k	-	ukupni broj čimbenika
K _o	-	koeficijent oblika otpreska
K _u	-	koeficijent unutrašnjosti otpreska
L	mm	duljina
l	-	nepotpunost plana
L ₀	mm	mjerna duljina
l ₀	mm	početna duljina
l ₁	mm	duljina uskog paralelnog dijela
l ₂	mm	udaljenost između proširenog paralelnog dijela
l ₃	mm	ukupna duljina
log N	-	broj promjena
N	-	broj pokusa
n _c	-	broj stanja u centru pokusa
m _g	kg	masa grozda
m _{gmax}	kg	maksimalna masa grozda
p	bar	tlak
p _H	bar	tlak u hidrauličkom sustavu ubrizgavalice
p _{Hn}	bar	naknadni tlak u hidrauličkom sustavu ubrizgavalice
p _{Hs}	bar	tlak stlačivanja u hidrauličkom sustavu ubrizgavalice
p _{Hu}	bar	tlak ubrizgavanja u hidrauličkom sustavu ubrizgavalice
p _K	bar	tlak u kalupnoj šupljini
r	mm	polumjer
r ₁	mm	mali polumjer
r ₂	mm	veliki polumjer
R _m	N/mm ²	rastezna (vlačna) čvrstoća
R _p	N/mm ²	prekidna čvrstoća
R _r	N/mm ²	granica razvlačenja
s ₀	m	karakteristična izmjera otpreska
Sp	-	uljevna sapnica

t	s	vrijeme
T	K	temperatura
T_0	K	temperatura okoline
t_c	s	vrijeme ciklusa injekcijskog prešanja
t_h	s	vrijeme hlađenja otpreska
t_{np}	s	vrijeme djelovanja naknadnog tlaka
t_p	s	pomoćno vrijeme ciklusa injekcijskog prešanja
T_{PK}	K	povišena temperatura kalupa
t_u	s	vrijeme ubrizgavanja
U	-	ušće
V	m^3	volumen
V_o	m^3	početni volumen
α	-	udaljenost stanja pokusa u osima od centra pokusa
δ	N/mm^2	dinamička izdržljivost
ΔF	N	promjena sile
ΔK	N/mm^2	modul stlačivosti
Δl	mm	produljenje
Δp_K	bar	promjena tlaka u kalupnoj šupljini
$\Delta \vartheta_K$	$^{\circ}C$	promjena temperatura stijenke kalupne šupljine
ε	%	istezanje
ε_{el}	%	elastično istezanje
ε_k	%	konačno istezanje
ε_p	%	prekidno istezanje
ε_u	%	ukupno istezanje
ϑ	$^{\circ}C$	temperatura
ϑ_D	$^{\circ}C$	dodirna temperatura
ϑ_K	$^{\circ}C$	temperatura stijenke kalupne šupljine
ϑ_{Kmax}	$^{\circ}C$	maksimalna temperatura stijenke kalupne šupljine
ϑ_{Kmin}	$^{\circ}C$	minimalna temperatura stijenke kalupne šupljine
ϑ_M	$^{\circ}C$	temperatura medija za temperiranje
ϑ_{OK}	$^{\circ}C$	temperatura otvaranja kalupa
ϑ_{PO}	$^{\circ}C$	temperatura postojanosti oblika otpreska
ϑ_T	$^{\circ}C$	temperatura taljevine
σ_p	N/mm^2	pritisno naprezanje
σ_R	N/mm^2	rastežno naprezanje
σ_s	N/mm^2	savojno naprezanje
σ_t	N/mm^2	tlačno naprezanje
τ_s	N/mm^2	smično naprezanje
τ_t	N/mm^2	uvojno (torzijsko) naprezanje

POPIS KRATICA

<u>Kratika</u>	<u>Opis</u>
Al	aluminij
Cu	bakar
DIN	njemački institut za standardizaciju (<i>nj. Deutsches Institut für Normung</i>)
ISO	internacionalna organizacija za standardizaciju
MFI	indeks tečenja taljevine (<i>e. Melt Flow Index</i>)
PA	poliamid
PE	polietilen
PE-LD	polietilen niske gustoće
PMMA	poli(metil-metakrilat)
PP	polipropilen
PS	polistiren

SAŽETAK

Tema ovog diplomskog rada je “Analiza utjecaja parametara injekcijskog prešanja na mehanička svojstva linije spajanja”. U sklopu rada bilo je potrebno detaljno razraditi proces injekcijskog prešanja te utjecaj njegovih najvažnijih parametara, kako u teoriji tako i u praksi.

U prvom dijelu rada opisan je teorijski dio injekcijskog prešanja, sa posebnim naglaskom na njegove najvažnije parametre. Zatim su opisani kalup i ispitno tijelo, oboje prema ISO normama. Na koncu teorijskog dijela, obrazloženi su postupci ispitivanja mehaničkih svojstava.

Drugi dio temelji se na praktičnom dijelu, odnosno na ispitivanju utjecaja najvažnijih parametara injekcijskog prešanja na rasteznu čvrstoću linije spajanja. Za potrebe rada korištena je injekcijska ubrizgavalica proizvođača *Arburg*, temperiralo proizvođača *Regloplas* te kidalica proizvođača *WPM*. Kao medij za temperiranje odabrano je ulje, a korišteni polimerni materijal je bio PP (polipropilen).

Na kraju, računalnom analizom dobio se prikaz ovisnosti rastezne čvrstoće linije spajanja o temperaturi taljevine te vremenu naknadnog tlaka.

Ključne riječi: *injekcijsko prešanje, linija spajanja, rastezna čvrstoća, utjecaj parametara injekcijskog prešanja*

SUMMARY

The topic of this thesis is “Analysis of influence of injection moulding parameters on welded line mechanical properties”. Within the thesis it was needed to elaborate in detail the proces of injection moulding and its most significant parameters, both in theory and in practice.

In the first segment of this thesis, the theoretical part of injection moulding was described, with a particular focus on its most significant parameters. Then, the mould and the test specimens were described, both according to ISO standards . At the end of the theoretical part of the thesis, testing procedures of mechanical properties were explained.

The second part is based on practical work, primarily on testing the influence of injection moulding parameters on welded line tensile strenght. For testing purposes, an injection molding machine manufactured by *Arburg*, temperature controller manufactured by *Regloplas* and a tensile strenght testing machine manufactured by *WPM* were used. Oil was chosen as a medium for tempering, and the used polymer material was PP (polypropylene).

In the end, computer analysis showed the dependence of welded line thensile strenght to melt temperature and time of subsequent pressure.

Key words: *injection molding, welded line, tensile strenght, influence of injection molding parameters*

1. UVOD

Današnji svijet je nezamisliv bez polimera. Postali su dio svakodnevnog okruženja i sastav su mnogih vitalnim aspekata života. Jedan od najbitnijih postupaka preradbe polimera je injekcijsko prešanje. Kao proces injekcijsko prešanje je visoko automatiziran i dinamičan, s mnogo parametara. Svaki od tih parametara utječe na konačna svojstva polimera. Kako bi se išlo u korak sa današnjim tehnološkim napretkom i zahtjevima odgovarajuće razine kvalitete, potrebno je razumjeti kakav točno utjecaj imaju ti parametri.

Među bitnijim svojstvima je rastezna čvrstoća. Da bi se moglo “vladati” tim svojstvom, važno je znati koji parametri injekcijskog prešanja imaju najveći utjecaj na nju. Ovaj rad pruža detaljan uvid u rješenje tog pitanja. Također nam i prikazuje na koji način ta svojstva utječu na rasteznu čvrstoću.

Kako bi se dobio ispravan odgovor na spomenutu problematiku, potrebno je provesti pokuse. Injekcijsko prešanje ispitnih tijela prema ISO normama sa linijom spajanja na najužem dijelu omogućilo je prikupljanje i analizu potrebnih podataka. Postoje razni računalni paketi koji omogućuju stvaranje odgovarajućih planova pokusa, kao i brzu te točnu analizu rezultata, kako bi se donijeli ispravni zaključci.

U radu je prvo proveden pretpokus određivanja maksimalnog vremena trajanja naknadnog tlaka, odnosno onog vremena nakon kojeg naknadni tlak više nema utjecaja na ispitno tijelo. Sa vremenskim intervalom trajanja naknadnog tlaka, dobivenog iz prethodnog pretpokusa, te vrijednostima ostalih parametara injekcijskog prešanja, prema preporuci proizvođača materijala, proveden je pretpokus određivanja dva najutjecajnija parametra na rasteznu čvrstoću linije spajanja. U pokusu se detaljno analiziralo na koji način oni utječu na rasteznu čvrstoću linije spajanja ispitnih tijela.

2. INJEKCIJSKO PREŠANJE

Injekcijsko prešanje je najvažniji ciklički postupak preradbe polimera, a prema dostignutoj razini i najusavršeniji. Injekcijskim se prešanjem prerađuju svi polimeri: duromeri, elastomeri, elastoplastomeri, a posebno je proširena preradba plastomernih taljevina. Prema prerađenim je količinama injekcijsko prešanje polimera odmah iza ekstrudiranja. Istodobno, može se smatrati da je i tlačno lijevanje metala inačica injekcijskog prešanja (vrijedi i obrat). Injekcijskim se prešanjem danas prerađuju i keramičke smjese, kombinacije različitih materijala (npr. plastika, metal i keramika), pa i žive stanice. [1]

Osnovno obilježje suvremene opreme za injekcijsko prešanje je visok stupanj automatiziranosti, posebno ubrizgavalica, te najsuvremenije vođenje procesa, najčešće temeljeno na mikroprocesorima i primjeni računala. [1]

2.1. DEFINICIJA I POSTUPCI INJEKCIJSKOG PREŠANJA [1]

Injekcijsko prešanje polimera ciklički je postupak praoblikovanja ubrizgavanjem polimerne tvari potrebne smične viskoznosti iz jedinice za pripremu i ubrizgavanje u temperiranu kalupnu šupljinu. Tvorevina, otpresak, postaje polireakcijom i/ili umreživanjem, geliranjem i/ili hlađenjem podobnom za vađenje iz kalupne šupljine.

Otpresci mogu biti različitih veličina, mase manje od miligrama do približno 180 kg. Injekcijsko prešanje prikladno je za proizvodnju vrlo kompliciranih otpresaka, visoke dimenzijske stabilnosti (tolerancije od nekoliko mikrometara). Zbog dostignutoga visokog stupnja automatiziranosti, moguća je neprekinuta proizvodnja dvadeset i četiri sata na dan, sedam dana u tjednu. Moguće je načiniti otpreske u više boja, kombinaciju krutoga i savitljivoga dijela otpreska (tvrdo-meko), integralne pjenaste tvorevine itd.

Injekcijski se mogu prešati niskoviskozne kapljevine (npr. epoksidne smjese ili smjese za proizvodnju integralnih poliuretanskih pjenastih tvorevina) ili polimerne taljevine (povišena smična viskoznost).

2.2. LINIJA ZA INJEKCIJSKO PREŠANJE [1]

Za postupak injekcijskog prešanja potrebna je preradbena linija koju čine sustav za injekcijsko prešanje i dopunska oprema. Dopunska oprema povisuje djelotvornost procesa, a sastoji se od elemenata rukovanja tvarima i/ili materijalom i proizvodom (oprema za transport).

Svaki sustav za injekcijsko prešanje mora ispunjavati ove funkcije: priprema tvari potrebne smične viskoznosti, ubrizgavanje i stvaranje praoblika tvorevine pri propisanoj temperaturi kalupne šupljine. Pri preradbi polimernih materijala (plastomerne taljevine i elastoplastomeri) dolazi samo do promjene stanja materijala, čvrsto – kapljevito – čvrsto, što se ostvaruje geliranjem i/ili hlađenjem. Pri preradbi plastomernih monomera, duromernih tvari i kaučukovih smjesa, očvršćivanje tvari u potreban geometrijski oblik otpreska povezano je s kemijskim reakcijama polimeriziranja i/ili umreživanja. Pri injekcijskom prešanju metalnih čestica i keramičkih smjesa, iz kalupa se vadi *zeleni* otpresak, *zelenac*. Zatim slijedi uklanjanje polimernog veziva i očvršćivanje sraščivanjem.

Sustav za injekcijsko prešanje moguće je okarakterizirati kao dinamički, kontinuiran i nelinearan, stohastički, stabilan, s povratnim vezama. Istodobno je riječ o fleksibilnom, kompliciranom i kompleksnom sustavu.

2.3. INJEKCIJSKO PREŠANJE PLASTOMERNIH TALJEVINA [2]

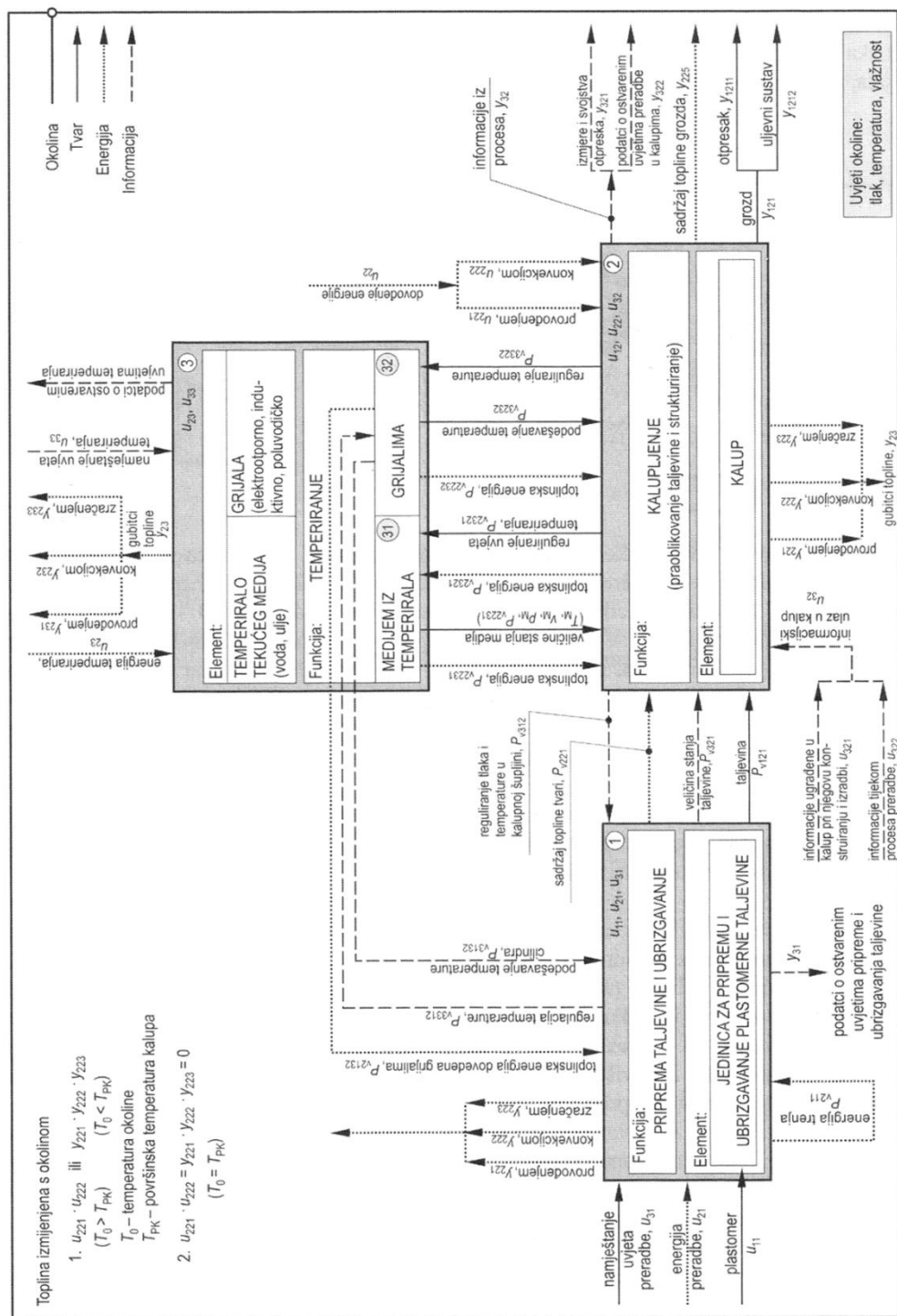
Sustav potreban za injekcijsko prešanje plastomernih taljevina, koji čine ubrizgavalica, kalup i temperiralo kalupa, može se prikazati modelom. Pojednostavnjeni model sustava za injekcijsko prešanje plastomera koji sadržava materijale, energijske i informacijske ulaze i izlaze te veze među elementima prikazan je na slici 2.1. Važni su i utjecaj okoline, temperatura, vlažnost (sušenje polimera) i tlak okolišnjeg zraka.

Ubrizgavalica se sastoji od četiri jedinice: jedinice za pripremu i ubrizgavanje taljevine, zatvaranje kalupa, pogonske jedinice i jedinice za vođenje (upravljenje i reguliranje) te zaštitnih uređaja.

Ubrizgavalice imaju samo jedan pužni vijak. Njegova je duljina obično 12 do 20, u novije vrijeme i više duljina promjera, koji može biti između 10 i 200 mm. Pužni se vijak potiskuje prema naprijed hidraulički pa se taljevina ubrizgava u kalup brzinom 1,5 m/s i pod visokim pritiskom obično do

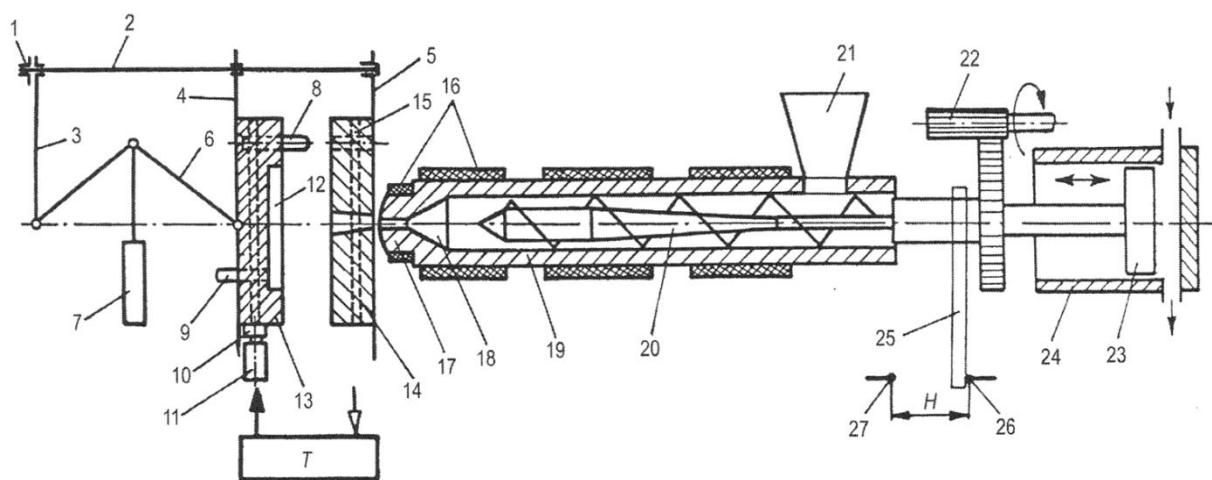
200 N/mm². Temperature taljevine obično su 150 do 425 °C, a stijenke kalupne šupljine -5 do 260 °C.

Najveća ubrizgavalica može odjednom ubrizgati 175 litara taljevine.



Slika 2.1. Modelni prikaz sistema za injekcijsko prešanje plastomernih taljevina [2]

Nekad je osnovno načelo ubrizgavanja bilo ubrizgavanje klipom, a danas je to ubrizgavanje pužnim vijkom (slika 2.2). Materijal ulazi kroz lijevak u zagrijani cilindar za taljenje, gdje ga zahvaća pužni vijak. Materijal se tali i skuplja pri vrhu pužnog vijka. Kad se skupi dovoljno rastaljenog materijala, pužni se vijak pomiče prema naprijed i ubrizgava taljevinu kroz mlaznicu i uljevni sustav u kalup. U početku hlađenja materijal se steže pa se taljevina i dalje drži pod naknadnim pritiskom (obično niži od pritiska ubrizgavanja). Poslije se pužni vijak vraća u početni položaj i priprema novu količinu materijala, a otpresak se u kalupu i dalje hladi, kalup se otvara i izradak se može izvaditi.



Slika 2.2. Sustav za injekcijsko prešanje pločastog otpreska: 1 – matica za namještanje visine kalupa, 2 – priječnica, 3 – uporišna ploča, 4 – pomični nosač kalupa, 5 – nepomični nosač kalupa, 6 – kutne poluge, 7 – hidraulički cilindar, 8 – vodeći zatik, 9 – izbacivalo, 10 – priključak, 11 – gipka cijev, 12 – kalupna šupljina, 13 – pomični dio kalupa, 14 – nepomični dio kalupa, 15 – kanal za temperiranje, 16 – pojasno grijalo, 17 – mlaznica, 18 – sabirnica, 19 – cilindar za taljenje, 20 – pužni vijak, 21 – lijevak, 22 – pogonski mehanizam pužnog vijka, 23 – hidraulički stap, 24 – cilindar za ubrizgavanje, 25 – pokretački slog – uklopni palac, 26 – stražnja krajnja sklopka, 27 – prednja krajnja sklopka; H – hod pužnog vijka, T – temperiralo [2]

Cilindar za taljenje završava mlaznicom, na koju se nastavlja kalup sa svojim uljevnim sustavom, kućištem, kalupnom šupljinom i mehanizmom za izbacivanje otpreska. Kućište se sastoji od sloga ploča kao nosive konstrukcije kalupa.

Uljevni sustav povezuje cilindar za taljenje s pomoću uljavnog tuljca, kanala i ušća s kalupnom šupljinom. Proračun i dimenzioniranje uljavnog sustava vrlo su važni za uspješan tijek procesa. Posebno su bitni oblik i veličina ušća (suženja uljavnog kanala na ulazu u kalupnu šupljinu). Oblik ušća odabire se prema vrsti i obliku otpreska pa ono može biti točkasto, plosnato, kružno, prstenasto, vrlo tanko (tzv. filmsko) itd. Zadaća je ušća da sprječava povrat taljevine za vrijeme

vraćanja pužnog vijka u početni položaj i suviše veliko stlačivanje taljevine tijekom naknadnog tlačenja i omogućavanje lakog odvajanja otpreska.

Dijelovi kalupa koji omeđuju kalupnu šupljinu fino su polirani, a izrađuju se od čelika, bronce, mjedi i nekih drugih metala i polimera. Od čelika to su obično nehrđajući prokaljivi čelici visoke tvrdoće ili žilavosti, poboljšani čelici ili čelici visoke površinske tvrdoće (čelici za cementiranje i nitriranje).

Kalup se sastoji od dva dijela, od kojih je jedan pomičan, pa se mogu rastaviti i spojiti. Nepomičan dio kalupa povezan je uljevnim sustavom s cilindrom za taljenje, a pomičan dio otvara i zatvara kalupnu šupljinu i može se pritom precizno centrirati elementima sustava za vođenje. U njega je ugrađen i uređaj za izbacivanje otpreska. Najčešće je to mehanički uređaj, ali se otpresci katkad izbacuju i tlakom zraka ili ulja.

Prema vrsti plastomera koji se prerađuju injekcijskim prešanjem, kalup treba održavati pri nekoj određenoj temperaturi (temperiranje kalupa), a katkad i jače zagrijavati ili hladiti. Tako su tijekom preradbe konstrukcijskih plastomera potrebne visoke temperature kalupa, dok se u proizvodnji vrlo tanke ambalaže kalup mora hladiti rashladnim strojevima. Naprikladniji medij za temperiranje kalupa jest voda u otvorenim ili zatvorenim temperiranim, kojoj se po potrebi dodaju sredstva za sniženje ledišta ili povišenje vrelišta. To je najčešće etilenglikol, koji omogućuje da se voda upotrebljava i do temperature 140 °C.

2.4. NAJVAŽNIJI PARAMETRI PROCESA INJEKCIJSKOG PREŠANJA

Brojni parametri procesa injekcijskog prešanja utječu na stvaranje otpreska. Uglavnom se pri tome razmatraju tlakovi, temperature i vremena. Pri analizi injekcijskog prešanja moguće je razmatrati preko 60 različitih parametara procesa. Međutim, najčešće se razmatra manji broj najutjecajnijih parametara koji će biti ukratko opisani u nastavku. [3]

2.4.1. TLAK UBRIZGAVANJA [4,5]

Tlak ubrizgavanja često se poistovjećuje s hidrauličkim tlakom ubrizgavalice ili se miješa s naknadnim tlakom. Ponekad se smatra konstantom, a ponekad promjenjivim parametrom, uz pogrešno dovodenje u relaciju s vremenom i prostorom. U mnogim se slučajevima smatra kako je tlak ubrizgavanja moguće podesiti na ubrizgavalici. To je u praksi nemoguće radi otpora tečenju

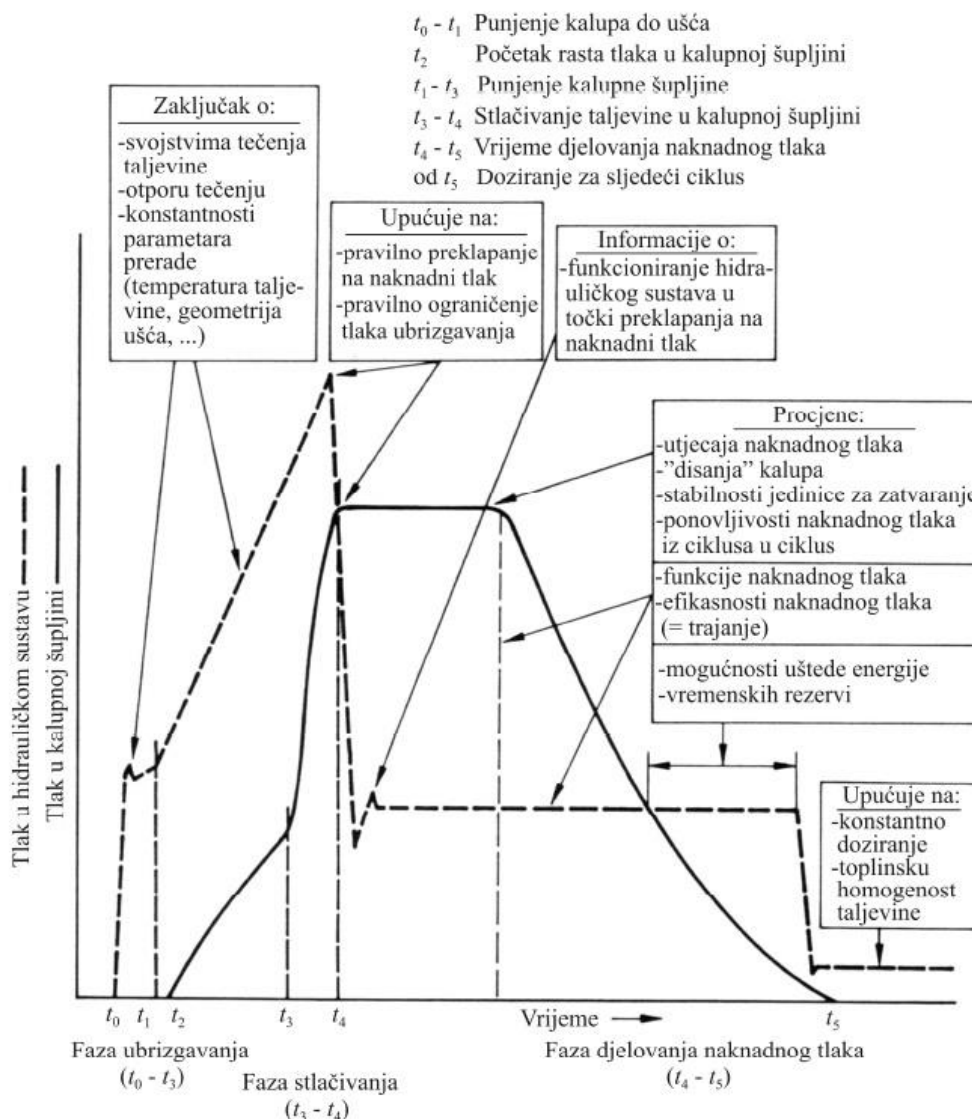
taljevine u uljevnom sustavu te kroz kalupnu šupljinu. Stoga taj tlak nije moguće smatrati konstantom tijekom ciklusa injekcijskog prešanja. Tlak ubrizgavanja raste od vrijednosti okolnog tlaka na maksimalni iznos kojeg je moguće samo predvidjeti primjerice s pomoću računalne simulacije. Stoga je pri opisu tog parametra potrebno raspolagati podacima o minimalnom, maksimalnom ili raspoloživom tlaku ubrizgavanja.

2.4.2. HIDRAULIČKI TLAK U JEDINICI ZA UBRIZGAVANJE

Hidraulički tlak u pogonskoj jedinici potreban je za savladavanje otpora tečenju materijala u mlaznici ubrizgavalice, uljevnom sustavu kalupa te kalupnoj šupljini. Tijek hidrauličkog tlaka vrlo se dobro poklapa s tijekom tlaka taljevine na vrhu pužnog vijka. Visoki otpor tečenju uzrokuje nagli porast hidrauličkog tlaka tijekom faze obujamnog punjenja kalupne šupljine. Viskoznost ulja u hidrauličkom sustavu je ovisna o temperaturi i utječe na vrijednost tlaka u hidrauličkom sustavu. Stoga je nezagrijanu ubrizgavalicu potrebno zagrijati kako bi ulje u hidrauličkom sustavu postiglo potrebnu radnu temperaturu. [5]

Ukoliko dolazi do bitnijih promjena u hidrauličkom tlaku tijekom faze ubrizgavanja, to je pokazatelj određenih poteškoća pri popunjavanju kalupne šupljine. Općenito se preporučuje mjerenje tlaka u hidrauličkom sustavu tijekom ciklusa injekcijskog prešanja. Mjerenje tog tlaka je jednostavno, a daje osnovne informacije o popunjavanju kalupne šupljine. Tlak taljevine na vrhu pužnog vijka ima profil sličan tlaku u hidrauličkom sustavu, no samo tijekom faze ubrizgavanja. Tijekom faze djelovanja naknadnog tlaka, profili im se bitno razlikuju (slika 2.3). Tlak u hidrauličkom sustavu stoga omogućuje uvid u zbivanja tijekom faze punjenja kalupne šupljine, no ne daje nikakve podatke o tijeku naknadnog tlaka i tijeku tlaka u kalupnoj šupljini. [4,5]

Profil tlaka u hidrauličkom sustavu omogućuje dobivanje uvida u pojavu otpora tečenju taljevine u mlaznici ubrizgavalice i uljevnom sustavu kalupa prije nego li taljevina dosegne eventualna osjetila tlaka postavljena u kalupnoj šupljini. Tlak u hidrauličkom sustavu raste s porastom otpora tečenju plastomerne taljevine tijekom punjenja kalupne šupljine. [4,5]



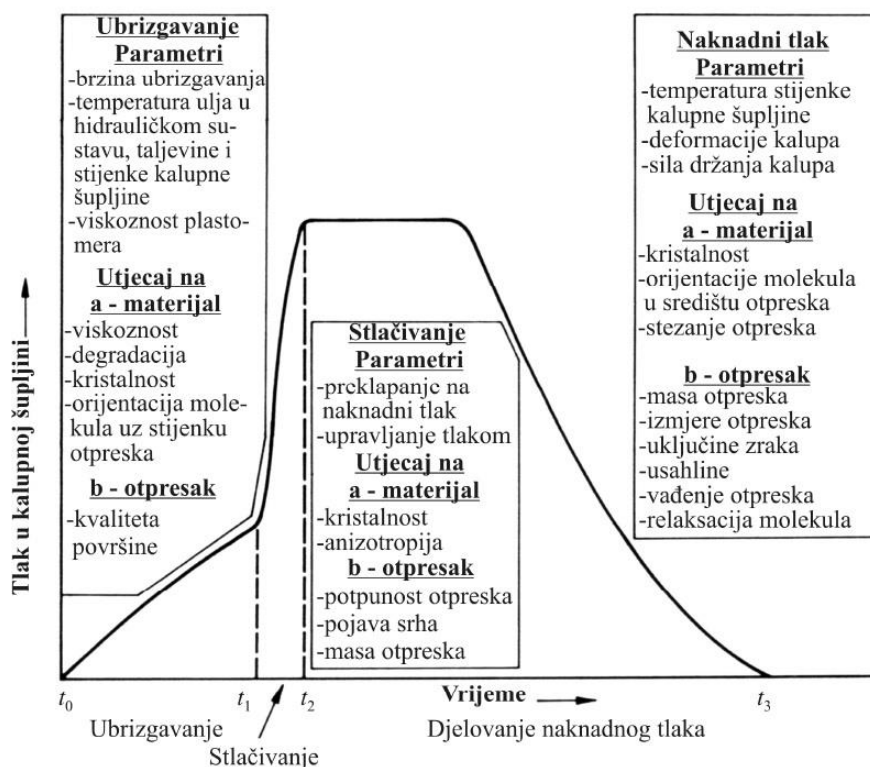
Slika 2.3. Informacije koje je moguće prikupiti bilježenjem tlakova u hidrauličkom sustavu i kalupnoj šupljini [5]

2.4.3. TLAK U KALUPNOJ ŠUPLJINI [5]

Analiza procesa injekcijskog prešanja trajno doprinosi njegovu učinkovitijem vođenju. Pri tome je tlak u kalupnoj šupljini središnja zavisna procesna varijabla. Profil tlaka mjereno u kalupnoj šupljini ovisi prvenstveno o položaju osjetila tlaka u kalupnoj šupljini (blizu ili dalje od ušća). Osjetila ne bilježe nikakav tlak tijekom faze ubrizgavanja do trenutka kada taljevina dođe u kontakt s osjetilom. Tijekom faze djelovanja naknadnog tlaka, tlak u kalupnoj šupljini moguće je mjeriti samo do trenutka kada se stijenka otpreska uslijed stezanja odvoji od stijenke kalupne šupljine, tj. osjetila tlaka. Stoga je osjetilo tlaka najuputnije postaviti u blizini ušća jer je na tom području moguće prikupiti najkvalitetnije podatke o otpresku, a vrijeme mogućeg mjerenja tlaka je najdulje (najmanje stezanje uslijed djelovanja naknadnog tlaka).

Slika 2.4 prikazuje tijek tlaka u kalupnoj šupljini te njegov utjecaj na svojstva otpreska. Prateći krivulju tlaka u kalupnoj šupljini moguće je uočiti tri različite faze: obujamno punjenje kalupne šupljine (faza punjenja), stlačivanje taljevine (faza stlačivanja) i održavanje plastomernog materijala tijekom očvršćivanja pri povišenom - naknadnom tlaku (faza djelovanja naknadnog tlaka).

Faza ubrizgavanja ima najviše utjecaja na pojavnost otpreska, dok faza djelovanja naknadnog tlaka najviše utječe na dimenzijsku stabilnost otpreska. Moguće je uočiti kako tlak u fazi punjenja uglavnom ima ulogu svladavanja otpora tečenju taljevine kroz uljevni sustav i kalupnu šupljinu, dok je utjecaj na kvalitetu otpreska vrlo mali. S druge strane, tlak u fazi stlačivanja, a posebice naknadni tlak, učinkovitije utječu na kvalitetu otpreska.



Slika 2.4. Utjecaj faza tijeka tlaka u kalupnoj šupljini na otpresak [5]

Profil tlaka u kalupnoj šupljini može upozoriti na tipične pogreške u procesu injekcijskog prešanja. Izražena vršna vrijednost tlaka tijekom faze stlačivanja rezultat je ozbiljne greške u procesu. Najčešće uzrok leži u netočno podešenoj točki preklapanja na naknadni tlak. Takva greška u pravilu rezultira pojavom srha na otpresku, te napetostima uslijed prekomjernog stlačivanja taljevine, odnosno smanjenom dimenzijskom stabilnošću otpreska i razlikama u postignutim težinama otpresaka iz ciklusa u ciklus.

2.4.4. PREKLAPANJE NA NAKNADNI TLAK

Kako se u praksi rijetko rabe osjetila tlaka u kalupnim šupljinama vrlo se često griješi u izboru točke preklapanja na naknadni tlak. Pri tome postoji nekoliko mogućnosti: ubrizgavanje bez preklapanja (a), ubrizgavanje s prekasnim preklapanjem (b), ubrizgavanje s preranim preklapanjem (c) i ubrizgavanje s optimalnim preklapanjem (d). [3-6]

Ubrizgavanje bez preklapanja na naknadni tlak je primjenjivo u slučajevima kada je konačni potrebni tlak u kalupnoj šupljini blizak tlaku tijekom ubrizgavanja. To je čest slučaj kada kalup ima malo ušće ili kada otpresak ima veliki omjer put tečenja/debljina stijenke. [4,5]

Pri određivanju točke preklapanja na naknadni tlak, uobičajena su četiri pristupa: [3-6]

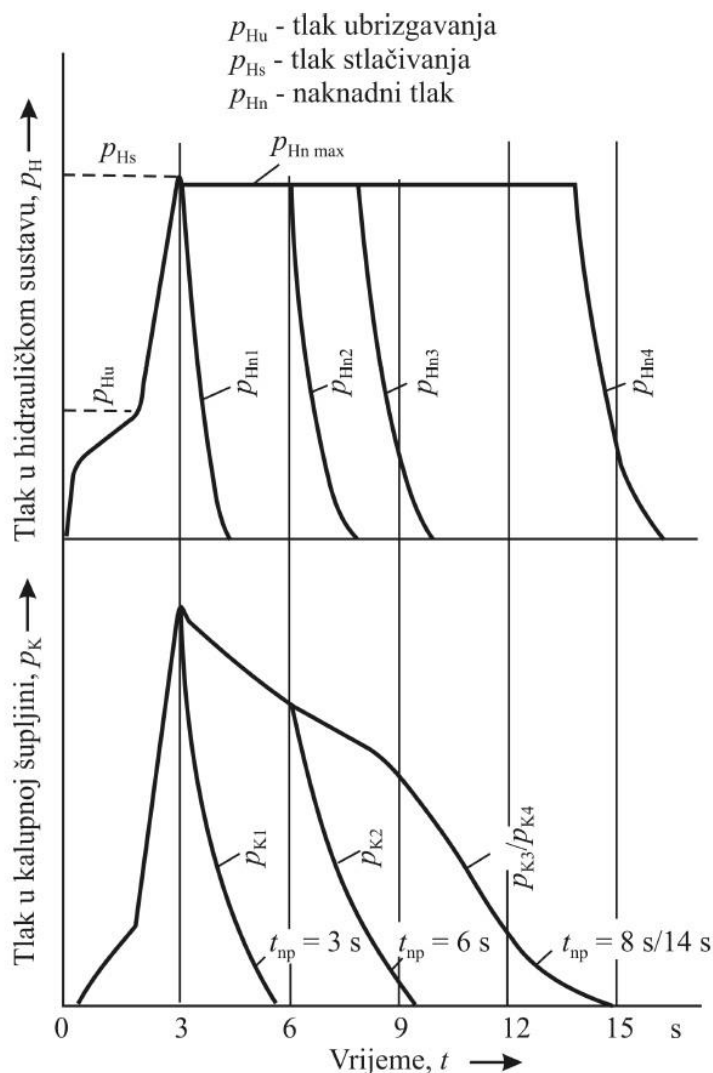
- preklapanje ovisno o vremenu
- preklapanje ovisno o prijednom putu pužnog vijka
- preklapanje ovisno o tlaku u kalupnoj šupljini
- preklapanje ovisno o sili držanja kalupa.

Najčešće se rabi preklapanje na naknadni tlak ovisno o prijednom putu pužnog vijka. Tim se pristupom omogućuje preklapanje na naknadni tlak pri istoj popunjenosti kalupne šupljine u svakom ciklusu. [3-5]

2.4.5. NAKNADNI TLAK (NAKNADNI TLAK U KALUPNOJ ŠUPLJINI)

Najvažniji razlog uporabe naknadnog tlaka tijekom ciklusa injekcijskog prešanja je dodavanje novog materijala u kalupnu šuplinu u cilju smanjenja stezanja materijala nastalog uslijed hlađenja. Time se sprječavaju pojave grešaka na otpresku kao što su mjehuravost i usahline, a stezanje i vitoperenje se minimiraju. Faza djelovanja naknadnog tlaka počinje točkom preklapanja s tlaka ubrizgavanja, a završava na kraju djelovanja naknadnog tlaka kada dolazi do pečačenja ušća. Tijekom faze djelovanja naknadnog tlaka, mala je korelacija između tijeka tlaka u hidrauličkom sustavu i u kalupnoj šupljini (slika 2.5). [4,5]

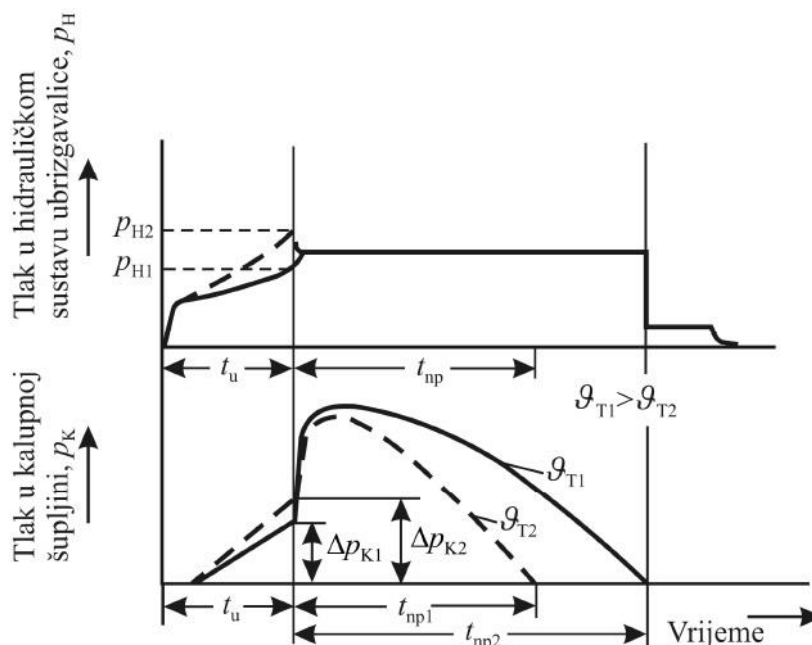
Vrijednost i trajanje naknadnog tlaka imaju bitan utjecaj na dimenzijsku stabilnost te optička svojstva otpreska. Određivanje vrijednosti naknadnog tlaka temelji se na jednostavnom mjerenju izmjera otpreska, kao i na vizualnom pregledu (izostanak usahlina). [5]



Slika 2.5. Korelacija između naknadnog tlaka u hidrauličkom sustavu ubrizgavalice i u kalupnoj šupljini: p_H - tlak u hidrauličkom sustavu ubrizgavalice, p_K - tlak u kalupnoj šupljini, t_{np} - vrijeme djelovanja naknadnog tlaka [5]

2.4.6. TEMPERATURA TALJEVINE

Temperatura taljevine izravno određuje termodinamička svojstva plastomerne taljevine kao što su viskoznost, entalpija i specifični obujam. Stoga temperatura taljevine ima izravan utjecaj i na neke parametre injekcijskog prešanja. Slika 2.6 prikazuje kako tlak u kalupnoj šupljini opada sa sniženjem temperature taljevine. Istodobno se skraćuje i vrijeme očvršćivanja ušća. To znači kako se skraćuje vrijeme tijekom kojeg se može utjecati na svojstva otpreska, ali se istodobno skraćuje i vrijeme ciklusa injekcijskog prešanja. [4,5]



Slika 2.6. Utjecaj temperature taljevine na tijek tlaka u hidrauličkom sustavu ubrizgavalice i kalupnoj šupljini: g_T - temperatura taljevine, t_u - vrijeme ubrizgavanja [5]

2.4.7. TEMPERATURA STIJENKE KALUPNE ŠUPLJINE

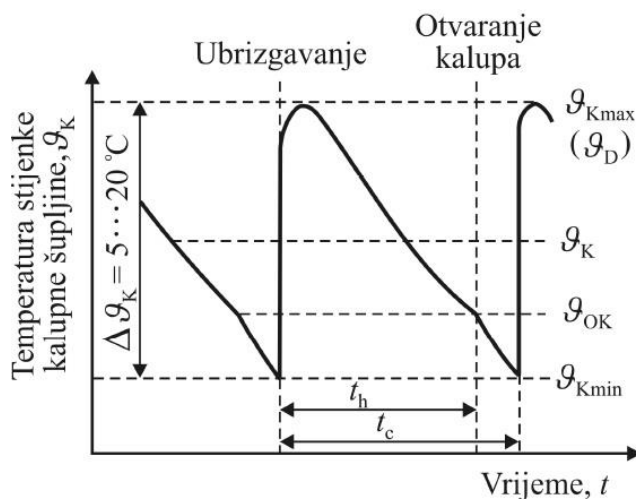
Temperatura stijenke kalupne šupljine zavisna je procesna varijabla i predstavlja glavni parametar koji utječe na svojstva otpreska, proizvodnost procesa, točnost i preciznost izmjera otpreska, ponovljivost procesa itd. [5]

Kada se govori o temperaturi stijenke kalupne šupljine, potrebno je naglasiti kako se ne radi samo o jednoj temperaturi već o temperaturnom polju (slika 2.7) koje se ciklički mijenja (od ciklusa do ciklusa). [7]

U trenutku dodira plastomerne taljevine sa stijenkom kalupne šupljine, na njoj se uspostavlja maksimalna temperatura u ciklusu, dodirna temperatura (g_D). Kako medij za temperiranje, a često i okolina kalupu odvođe toplinu, temperatura stijenke kalupne šupljine pada do trenutka otvaranja kalupa, kada se na stijenci kalupne šupljine uspostavlja temperatura otvaranja kalupa (g_{OK}). [7]

Nakon otvaranja kalupa slijedi vađenje otpreska iz kalupne šupljine tijekom kojeg temperatura stijenke kalupne šupljine dodatno pada do svoje minimalne vrijednosti (g_{Kmin}). Temperatura stijenke kalupne šupljine koja se rabi tijekom proračuna (analitičkih i numeričkih), te koju propisuju proizvođači polimernih materijala je u stvari računaska vrijednost koja predstavlja

aritmetičku sredinu između dodirne temperature i temperature stijenke u trenutku otvaranja kalupa. Pri tome valja napomenuti kako prethodno objašnjenje temperature stijenke kalupne šupljine vrijedi samo za određenu točku na stijenci kalupne šupljine. Kako se tijekom procesa injekcijskog prešanja u kalupnoj šupljini na različitim mjestima postižu i različita toplinska stanja, to znači kako u kalupnoj šupljini također postoji čitavo prostorno polje temperatura stijenke kalupne šupljine. [7]



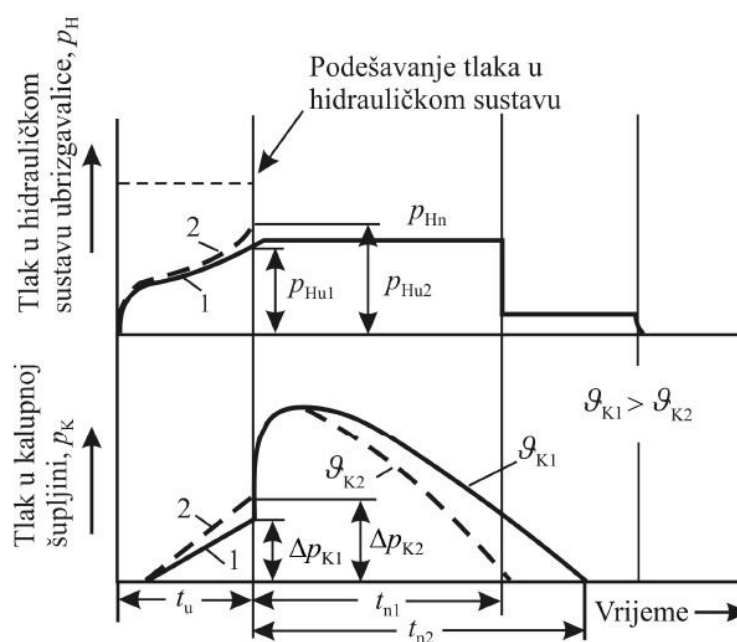
Slika 2.7. Temperaturno polje u kalupu: ϑ_K - temperatura stijenke kalupne šupljine, ϑ_D - dodirna temperatura, ϑ_{OK} - temperatura otvaranja kalupa, t_c - vrijeme ciklusa injekcijskog prešanja, t_h - vrijeme hlađenja otpreska [7]

Općenito temperaturu stijenke kalupne šupljine smatra se jednim od najutjecajnijih parametara injekcijskog prešanja za postizanje odgovarajućih svojstava otpresaka. Posebice je bitno trajno održavanje postignute propisane temperature stijenke kalupne šupljine. Međutim radi se o slučajnoj varijabli koja ovisi o većem broju statičkih i dinamičkih čimbenika. Toplinska svojstva materijala stijenke kalupne šupljine te promjer i raspored kanala za temperiranje predstavljaju statičke čimbenike. Temperatura taljevine, temperatura okoline, brzina i temperatura medija za temperiranje, te vremena hlađenja otpreska odnosno ciklusa injekcijskog prešanja predstavljaju dinamičke čimbenike. Kako se svi navedeni čimbenici ciklički mijenjaju tijekom ciklusa injekcijskog prešanja postoji samo određena vjerojatnost da se iz ciklusa u ciklus održi propisana temperatura stijenke kalupne šupljine. [3-9]

Stoga je moguće zaključiti kako temperatura stijenke kalupne šupljine nije izravno upravljiv parametar injekcijskog prešanja. Temperaturu stijenke kalupne šupljine moguće je mjeriti s pomoću odgovarajućih osjetila temperature, te na temelju dobivenih rezultata podešavati pa i

regulirati izravno podesive parametre u cilju postizanja propisane temperature stijenke kalupne šupljine. [3,7]

Temperatura stijenke kalupne šupljine ima vrlo mali utjecaj na tijek tlaka u kalupnoj šupljini u fazi punjenja kalupa radi kratkog vremena hlađenja unutar faze punjenja. S druge strane, temperatura stijenke kalupne šupljine snažno utječe na tijek tlaka u fazi djelovanja naknadnog tlaka, jer se tim parametrom definiraju uvjeti hlađenja (očvršćivanja) otpreska (slika 2.8). [4]



Slika 2.8. Utjecaj temperature stijenke kalupne šupljine na tijek tlaka u hidrauličkom sustavu ubrizgavalice i tlaka u kalupnoj šupljini [5]

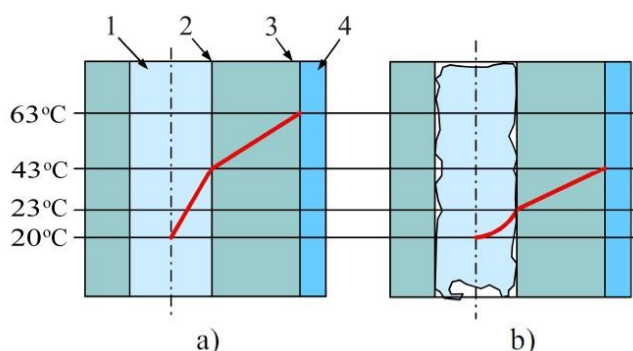
2.4.8. TEMPERATURA MEDIJA ZA TEMPERIRANJE [7]

Pri priključivanju kalupa na temperiralo ili izravno na vodovodnu mrežu, kroz kanale za temperiranje kalupa ustrujava medij za temperiranje. Pri injekcijskom prešanju plastomera medij za temperiranje predaje ili preuzima toplinu kalupu, pa se temperatura medija pri prolasku kroz kanale za temperiranje mijenja. Stoga postoje ulazna i izlazna temperatura medija za temperiranje. Temperatura medija za temperiranje (ϑ_M) predstavlja aritmetičku sredinu tih dviju vrijednosti. Temperatura medija za temperiranje predstavlja jedan od izravno podesivih parametara s pomoću kojih je moguće podešavanje temperaturnog polja u kalupu. U tom slučaju potrebno je raspolagati temperiralom koje održava željenu (propisanu) ulaznu temperaturu medija za temperiranje. Pri izravnom priključku kalupa na vodovodnu mrežu takvo podešavanje nije moguće. Tada je kalupu moguće samo odvoditi toplinu.

2.4.9. BRZINA (PROTOK) MEDIJA ZA TEMPERIRANJE

Učinkovitost temperiranja kalupa izražava se preko izmjene topline između stijenke kalupne šupljine i medija za temperiranje. Temperaturni gradijent od stijenke kalupne šupljine do medija za temperiranje sastoji se od dvaju dijelova: gradijent kroz materijal elemenata kalupne šupljine ovisan o toplinskoj prohodnosti materijala i gradijent na stijenci kanala medija za temperiranje ovisan o protoku medija za temperiranje. [7,10,11]

Strujanje medija za temperiranje može biti laminarno, turbulentno i prijelazno. Pri niskim brzinama medija za temperiranje tečenje medija je laminarno, a toplota preuzeta sa stijenke kanala za temperiranje treba biti izmijenjena kroz slojeve laminarnog strujanja. Kako su mediji za temperiranje u pravilu loši vodiči topline, izmjena topline je neefikasna (slika 2.9 a). S povišenjem brzine protoka medija za temperiranje brzina izmjene topline se povisuje na stijenama kanala za temperiranje, sve dok se ne postigne turbulentno strujanje medija. U tom slučaju vektor brzine tečenja medija dobiva i dodatni vektor okomit na smjer kanala za temperiranje, što uzrokuje dramatično povišenje učinkovitosti izmjene topline (slika 2.9 b). [7,111]



Slika 2.9. Temperaturni gradijent kroz stijenku kalupa: a) pri laminarnom strujanju, b) pri turbulentnom strujanju; 1 - medij za temperiranje, 2 - stijenka kanala za temperiranje, 3 - stijenka kalupne šupljine, 4 - otpresak [11]

Veličina kojom je moguće opisati strujanje medija za temperiranje kroz kanale je Reynoldsov broj. Intenzivna izmjena topline zahtijeva Reynoldsove brojeve veće od 10 000. [7,10,11]

2.4.10. BRZINA UBRIZGAVANJA (VRIJEME UBRIZGAVANJA)

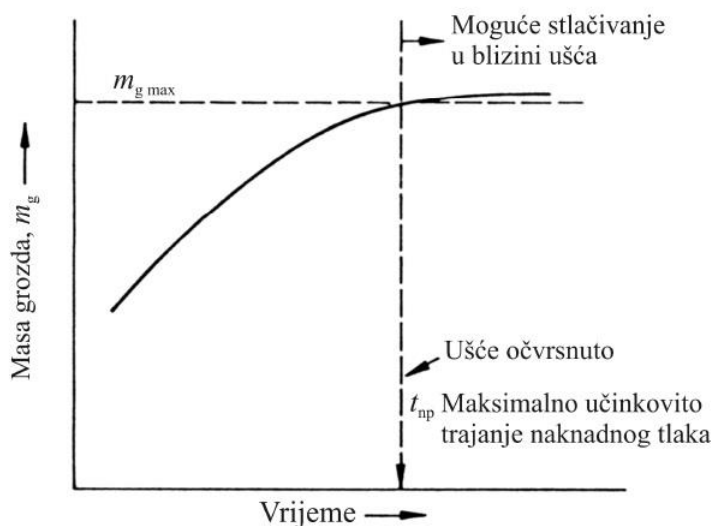
Brzina koja je bitna za proces injekcijskog prešanja je brzina kretanja pužnog vijka tijekom ubrizgavanja taljevine u kalup. Vrijeme ubrizgavanja obrnuto je proporcionalno brzini ubrizgavanja. Vrijeme ubrizgavanja sačinjavaju vrijeme potrebno za popunjavanje kalupne

šupljine plastomernom taljevinom, vrijeme stlačivanja taljevine i vrijeme održavanja maksimalnog tlaka u kalupnoj šupljini. To je vrijeme u pravilu vrlo kratko no bitno za kvalitetu otpreska. Kratko vrijeme ubrizgavanja uzrokuje istodobno veliki pad tlaka. S druge strane produljena vremena ubrizgavanja uzrokuju smanjenje efektivnog presjeka kroz kojeg teče taljevina uslijed očvršćivanja taljevine, što opet dovodi do većeg pada tlaka. [4,5,7]

Tlak u hidrauličkom sustavu raste s porastom brzine ubrizgavanja, što je moguće objasniti porastom otpora tečenju taljevine u mlaznici ubrizgavalice i ušću kalupa. Pad tlaka tijekom punjenja kalupne šupljine, mjereno u blizini ušća, veći je pri nižoj brzini ubrizgavanja. To je odraz istodobnog procesa hlađenja otpreska, tijekom kojeg se povisuje viskoznost taljevine i smanjuje efektivni presjek tečenja taljevine. Sa stajališta proizvodnosti i kvalitete otpreska, brzina ubrizgavanja trebala bi biti što je moguće viša. [5]

2.4.11. VRIJEME DJELOVANJA NAKNADNOG TLAKA

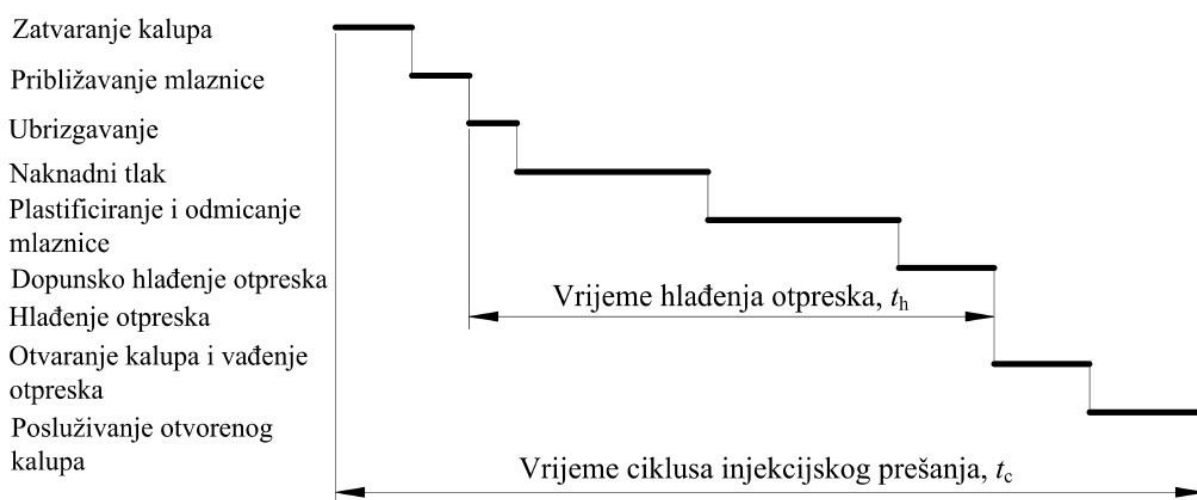
Pod vremenom djelovanja naknadnog tlaka najčešće se smatra vrijeme potrebno za očvršćivanje ušća. Drugi je pristup dovođenje u vezu vremena djelovanja naknadnog tlaka i mase otpreska. Sustavnim mjerenjem moguće je uočiti da nakon određenog vremena, produljenje vremena djelovanja naknadnog tlaka neće imati utjecaja na povećanje mase proizvoda (slika 2.10). Stoga je moguće odrediti optimalno vrijeme djelovanja naknadnog tlaka. [3,5]



Slika 2.10. Određivanje optimalnog vremena djelovanja naknadnog tlaka [5]

2.4.12. VRIJEME HLAĐENJA OTPRESKA [7]

Vrijeme hlađenja otpreska najčešće predstavlja najdulje vrijeme ciklusa injekcijskog prešanja. Stoga je pri optimiranju ciklusa injekcijskog prešanja posebnu pozornost potrebno posvetiti određivanju vremena hlađenja otpreska. Prema normi DIN 24450 vrijeme hlađenja otpreska definira se kao vrijeme koje započinje naredbom “ubrizgavanje”, a završava naredbom “otvaranje kalupa”. Tako definirano vrijeme hlađenja u sebi obuhvaća sljedeće operacije: ubrizgavanje, djelovanje naknadnog tlaka, plastificiranje i vraćanje mlaznice u početni položaj (slika 2.11). Najčešće sve navedene operacije završavaju prije nego li se otpresak ohladi do temperature postojanosti oblika. Stoga je nužno ostvariti dodatno vrijeme hlađenja otpreska.



Slika 2.11. Analiza ciklusa injekcijskog prešanja [7]

Proračun vremena hlađenja otpreska temelji se na rješavanju Fourierove diferencijalne jednadžbe: [7]

$$\frac{\partial \vartheta}{\partial t} = a \nabla^2 \vartheta \quad (2.1)$$

gdje su: ϑ - temperatura ($^{\circ}\text{C}$), t - vrijeme (s), a - toplinska difuzivnost.

Jedno od mogućih analitičkih rješenja je opća jednadžba hlađenja otpreska: [7]

$$t_h = \frac{s_0^2}{K_0 \cdot a_{ef} \cdot \pi^2} \cdot \ln \left(K_U \frac{\vartheta_T - \vartheta_K}{\vartheta_{PO} - \vartheta_K} \right) \quad (2.2)$$

gdje su: t_h - vrijeme hlađenja otpreska (s), s_o - karakteristična izmjera otpreska (debljina stijenke) (m), K_O - koeficijent oblika otpreska, a_{ef} - efektivna toplinska difuznost (m^2/s), K_U - koeficijent unutrašnjosti otpreska, ϑ_T - temperatura plastomerne taljevine ($^{\circ}C$), ϑ_K - temperatura stijenke kalupne šupljine ($^{\circ}C$), ϑ_{PO} - temperatura postojanosti oblika otpreska ($^{\circ}C$).

Pri različitim oblicima otpresaka, rabe se koeficijenti oblika i unutrašnjosti otpreska za jednostavnija geometrijska tijela.

2.4.13. VRIJEME CIKLUSA INJEKCIJSKOG PREŠANJA [7]

Vrijeme ciklusa injekcijskog prešanja sastoji se od vremena hlađenja otpreska i pomoćnih vremena: [7]

$$t_c = t_h + t_p \quad (2.3)$$

gdje su: t_c - vrijeme ciklusa (s), t_p - pomoćno vrijeme (s).

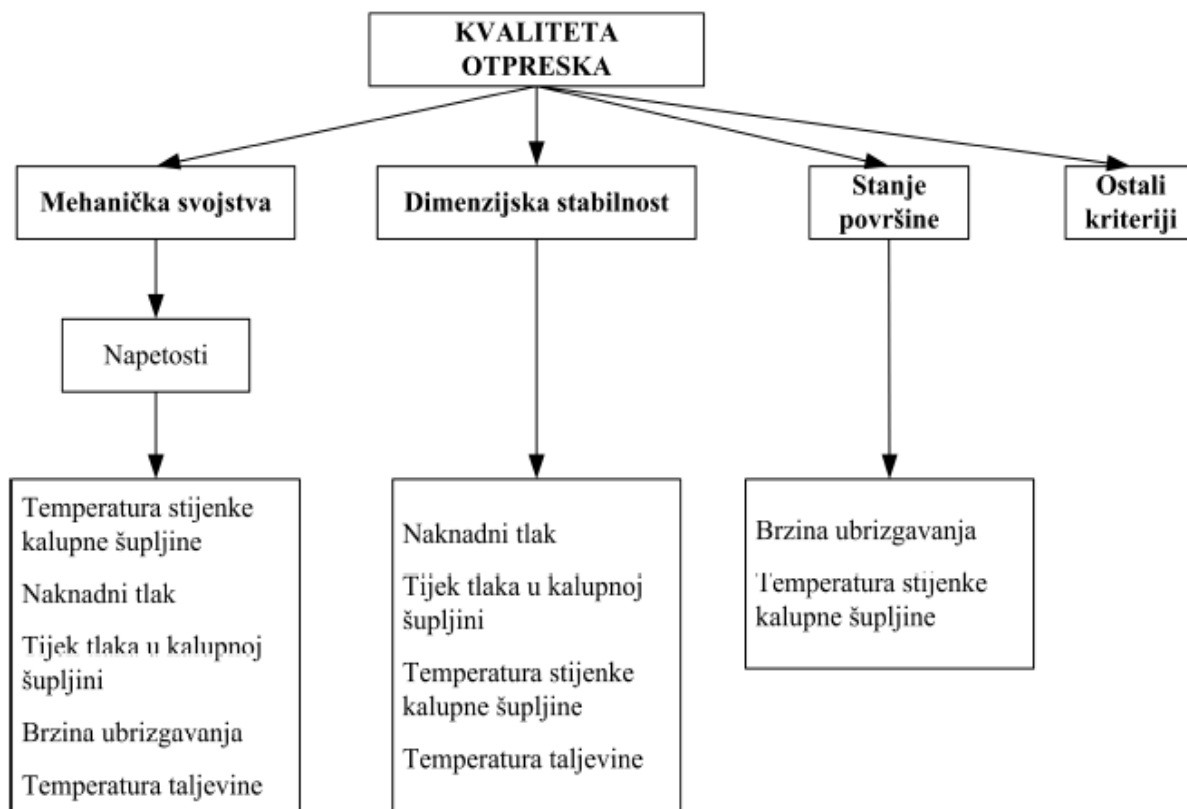
Općenito, pomoćno vrijeme ciklusa injekcijskog prešanja dijeli se na: vrijeme podmazivanja i čišćenja kalupa, vrijeme posluživanja otvorenog kalupa, vrijeme zatvaranja kalupa, vrijeme ukapčanja, vrijeme približavanja mlaznice, vrijeme otvaranja kalupa i vrijeme vađenja otpreska iz kalupne šupljine. Pomoćno vrijeme se u već uhodanom ciklusu najčešće sastoji od vremena zatvaranja kalupa, vremena otvaranja kalupa i vremena vađenja otpreska iz kalupa.

2.5. UTJECAJ PARAMETARA INJEKCIJSKOG PREŠANJA NA SVOJSTVA OTPRESKA

Svi elementi sustava za injekcijsko prešanje utječu na kvalitetu otpreska te međusobno. Stoga samo optimalno sastavljen sustav za injekcijsko prešanje plastomera uz optimalno podešene uvjete preradbe može rezultirati proizvodnjom dimenzijski stabilnih otpresaka optimalne kvalitete uz minimalno trajanje ciklusa. Pri optimalnom vođenju procesa injekcijskog prešanja cilj je uz minimalni utrošak vremena, energije i materijala proizvesti kvalitetan otpresak. Kako su konačne veličine (npr. kvaliteta otpreska, utrošak energije itd.) kao takve nemjerljive, treba ih dovesti u korelaciju s lako mjerljivim veličinama procesa (npr. brzina ubrizgavanja, temperatura taljevine, temperatura stijenke kalupne šupljine, tlak ubrizgavanja itd.). [3,8]

Kvalitetu otpreska moguće je podijeliti u 5 skupina: stanje površine otpreska, dimenzijska stabilnost, mehanička svojstva, unutrašnja svojstva, ostala svojstva. [3,8]

Povezanost pojedinih parametara procesa injekcijskog prešanja s kvalitetom otpreska prikazuje slika 2.12 iz koje je vidljivo kako je kvaliteta otpreska očito funkcija prošlosti procesa, a ona je rezultat parametara preradbe. [3,7]



Slika 2.12. Kvaliteta otpreska u ovisnosti o parametrima preradbe [3,7]

Prethodna istraživanja su ukazala kako su pri klasičnom injekcijskom prešanju najutjecajniji parametri na kvalitetu otpreska: [12]

- temperatura stijenke kalupne šupljine
- tlak u kalupnoj šupljini
- temperatura taljevine
- brzina (vrijeme) ubrizgavanja.

Analiza temperature stijenke kalupne šupljine i tlaka u kalupnoj šupljini te njihova korelacija s konačnim veličinama pokazali su kako se mjerenjem tih termodinamičkih veličina stanja može najbolje opisati događaje u procesu te se dobiti najviše informacija o kvaliteti otpreska. [3,13]

2.6. DIMENZIJSKA STABILNOST OTPRESKA

Svi do sada spomenuti parametri preradbe imaju izravan ili posredan utjecaj na izmjere otpreska. Pri tome prevladava utjecaj naknadnog tlaka i vremena njegovog djelovanja (tablica 2.1). To znači kako je za definiranje dimenzijske stabilnosti otpreska najvažnija faza djelovanja naknadnog tlaka u ciklusu injekcijskog prešanja. [5]

Tablica 2.1. Utjecaj parametara injekcijskog prešanja na izmjere otpreska [5]

Parametar	Utjecaj	Izmjere otpreska
Povišenje temperature taljevine	- povećanje obujma	↓
Povišenje temperature stijenke kalupne šupljine	- viša temperatura otvaranja kalupa	↓
Povišenje brzine ubrizgavanja	- bolji prijenos naknadnog tlaka u kalupnu šupljinu	↑
Povišenje naknadnog tlaka	- bolja kompenzacija stezanja, bolje stlačivanje taljevine	↑
Produljenje vremena djelovanja naknadnog tlaka	- isto kao i prethodno (prije pečačenja ušća) - nakon pečačenja ušća	↑ -
Povećanje deformacija kalupa uslijed tlaka u kalupnoj šupljini	- disanjem kalupa omogućuje se bolje djelovanje naknadnog tlaka	↑
Povećanje presjeka ušća	- posredni utjecaj (ovisno o brzini ubrizgavanja, naknadnom tlaku i temperaturi taljevine)	↑

3. KALUP

Kalup je središnji element svake proizvodne linije, pa tako i one za injekcijsko prešanje. Potrebno je naglasiti da mu se, usprkos važnosti kalupa, koji je u pravilu posebno izrađeni element sustava za injekcijsko prešanje, ne posvećuje dovoljna pozornost. [14]

Ukazat će se na neke važnije trendove u razvoju kalupa. Od izradbe prvoga alata, kamene oštrice pa sve do sredine 20. stoljeća, alatničarstvo se temeljilo na iskustvu. U drugoj polovici 20. stoljeća, osobito od sedamdesetih godina, sve se učestalije proračunavaju zbivanja u kalupu te se u njemu simuliraju reološka, toplinska i mehanička zbivanja. Taj će se trend u narednom razdoblju nastaviti i trajno širiti. Konstruiranje s pomoću računala je *stanje tehnike*. Međutim, konstruiranje s pomoću računala povezano je s jednim ozbiljnim problemom: sve češće se konstruktor kalupa, osobito pri varijantnom, znači vrlo učestalom konstruiranju, pretvara u *montažera*. To može rezultirati velikim psihičkim opterećenjem, a zbog smanjene kreativnosti jer se sve ubrzanije ponavljaju ista rješenja. Stoga je predloženo da se pri varijantnom konstruiranju s više inačica povežu funkcije konstruiranja otpreska, kalupa i pripreme programa za računalnu obradu i da ih obavlja jedna osoba. S motrišta konstrukcije kalupa sve važnijim postaju proračuni skupljanja i vitoperenja otpreska. [14]

Obilježje su suvremene izradbe kalupa visokobrzinski postupci obradbe odvajanjem čestica te posebni postupci. Tijekom izradbe prevlače se dodirni dijelovi kalupa s prerađivanom tvari u svrhu minimiranja trošenja. To ima najčešće za posljedicu olakšano punjenje kalupne šupljine. Zbog sve manjih serija i sve kraćih rokova isporuke proširuje se primjena postupaka brze proizvodnje kalupa. [14]

Za razliku od ubrizgavalice i temperirala, koje je moguće smatrati univerzalno primjenjivim elementima sustava za injekcijsko prešanje, kalup ima točno određenu namjenu i može u pravilu poslužiti samo za pravljenje jedne vrste otpresaka. [1]

Osnovni zadatci kalupa su: prihvaćanje taljevine pripremljene u ubrizgavalici, njezino očvršćivanje u željeni oblik otpreska te ciklički rad sustava za injekcijsko prešanje. Kalup mora sniženjem temperature taljevine dati oblik ubrizganom plastomeru i omogućiti da se dovoljno ohlađeni otpresak izvadi iz kalupne šupljine. Da bi kalup mogao odgovoriti postavljenim zahtjevima, mora imati ove elemente: uljevni sustav, kalupnu šupljinu, sustav za izbacivanje

otpreska, sustav za ostvarivanje međusobnog dodira nepomičnoga i pomičnoga dijela kalupa (sustav za vođenje) te kućište. [1]

Kalup može imati i neke druge elemente, koji se, međutim, javljaju samo u posebnim konstrukcijama. [1]

3.1. ULAZI U KALUP [1]

Na slici 2.1 ucrtana su dva ulaza u kalup: energijski, toplina dovedena kalupu iz okoline (u_{22}), i informacijski (u_{32}).

Prave li se otpresci koji zahtijevaju niske temperature stijenke kalupne šupljine, može se dogoditi da je temperatura okoline viša od temperature na površini kalupa koja je s njom u dodiru. U tom će slučaju okolina zagrijavati kalup. To se može javiti npr. pri preradbi polistirena i polietilena, i to u slučajevima kada je moguće praviti otpreske lošije kvalitete, a proizvodnost je od odlučujuće važnosti.

Važnost informacijskog ulaza u kalup zahtijeva podrobnije razmatranje. Svaki otpresak mora zadovoljiti određene uvjete, pri čemu valja imati na umu da je otpresak koji definira konstruktor proizvoda samo zamišljeni izradak (praotpresak), koji se u određenoj mjeri razlikuje od onoga koji izlazi iz kalupa kao materijalni izlaz (paotpresak).

Informacijski ulaz u kalup može se smatrati najvažnijim ulazom u sustav za injekcijsko prešanje, jer o njemu ovise svi ostali ulazi. Zbog tog ulaza vrijedi iskaz: kalup je središnji element linije za injekcijsko prešanje. Informacijski ulaz u kalup dijeli se u dva podulaza, informacije koje su ugrađene pri njegovu konstruiranju i izradbi (u_{321}) i informacije tijekom procesa preradbe (u_{322}).

Prvi podulaz (u_{321}) čine faktori koji se ugrađuju u kalup: oblik i kompleksna masivnost otpreska, veličina neravnina i sjaj površine kalupne šupljine, umetak, prosječno skupljanje i tolerancije izradbe kalupa. Drugu skupinu faktora koji se javljaju tijekom preradbe (u_{322}) čine: raspon skupljanja, tolerancija preradbe, broj otpresaka načinjenih u jednoj kalupnoj šupljini, pouzdanost i fleksibilnost kalupa te naknadna i završna obradba. Od navedenih devet elemenata informacijskog ulaza u kalup najvažniji je oblik i kompleksna masivnost otpreska. Zbog navedenih elemenata informacijskog ulaza u kalup, tijekom razvoja otpreska konstruktor proizvoda mora se držati određenih pravila i postupno rješavati određeni broj zadataka. To je npr. određivanje funkcije

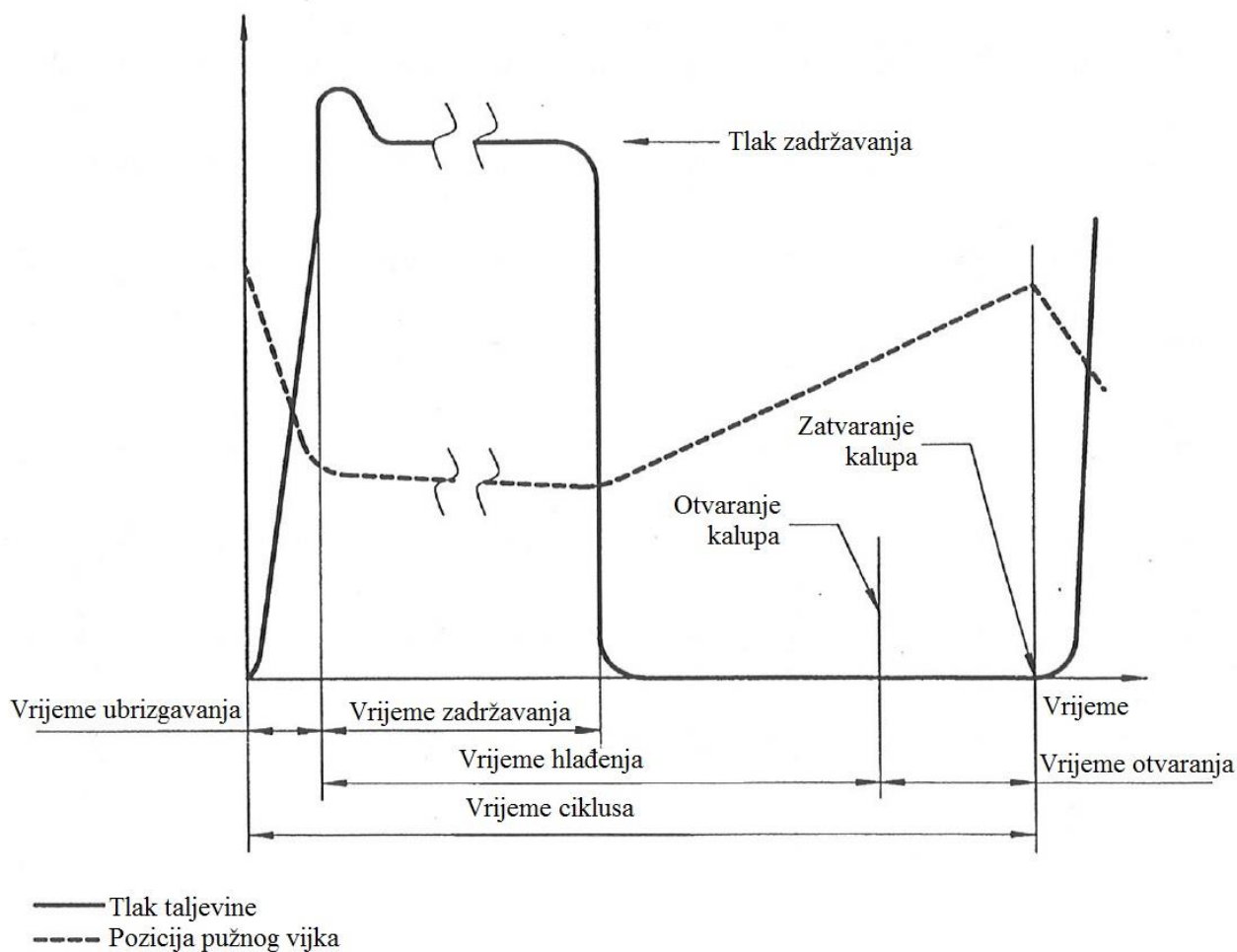
proizvoda, izbor polimera, estetski oblik, debljina stijenke itd. Pri razvoju novog proizvoda nije dovoljno izraditi crtež otpreska, već ga treba i opisati s pomoću *liste otpreska*. Takav obrazac sadržava 7 skupina osnovnih podataka:

- opće podatke o proizvodu, odnosno otpresku
- podatke o plastomeru
- podatke o geometriji otpreska
- zahtjeve o dimenzijskoj stabilnosti, tolerancije
- zahtjeve o kvaliteti proizvoda
- podatke o mogućem umetku, izrađenome od materijala različitog od plastomera
- podatke o potrebnoj naknadnoj i završnoj obradbi otpreska.

3.2. NORMA ISO 294 – 1: 1996 [15]

Ovaj dio norme ISO 294 specificira osnovna načela koje treba slijediti pri injekcijskom prešanju ispitnih tijela plastomernih materijala te pruža detalje konstrukcije kalupa za izradu dviju vrsti ispitnih tijela za prikupljanje relevantnih podataka, odnosno višenamjenska ispitna tijela specificirana prema normi ISO 3167 te ispitna tijela dimenzija 80 mm x 10 mm x 4 mm. Također pruža temelje za utvrđivanje prerađivačkih uvjeta pri injekcijskom prešanju. Njezina svrha je promovirati jednakost opisa glavnih parametara procesa injekcijskog prešanja te također utvrditi jednakost pri izvještavanju o uvjetima procesa injekcijskog prešanja.

Određeni uvjeti potrebni za pripremu ispitnih tijela koji će dati rezultate za uspoređivanje će se razlikovati ovisno o upotrebljenom materijalu. Ovi uvjeti su navedeni u međunarodnim standardima za određeni materijal. Slika 3.1 opisuje ukupni ciklus injekcijskog prešanja, prikazujući temperaturu taljevine i poziciju pužnog vijka u funkciji vremena.

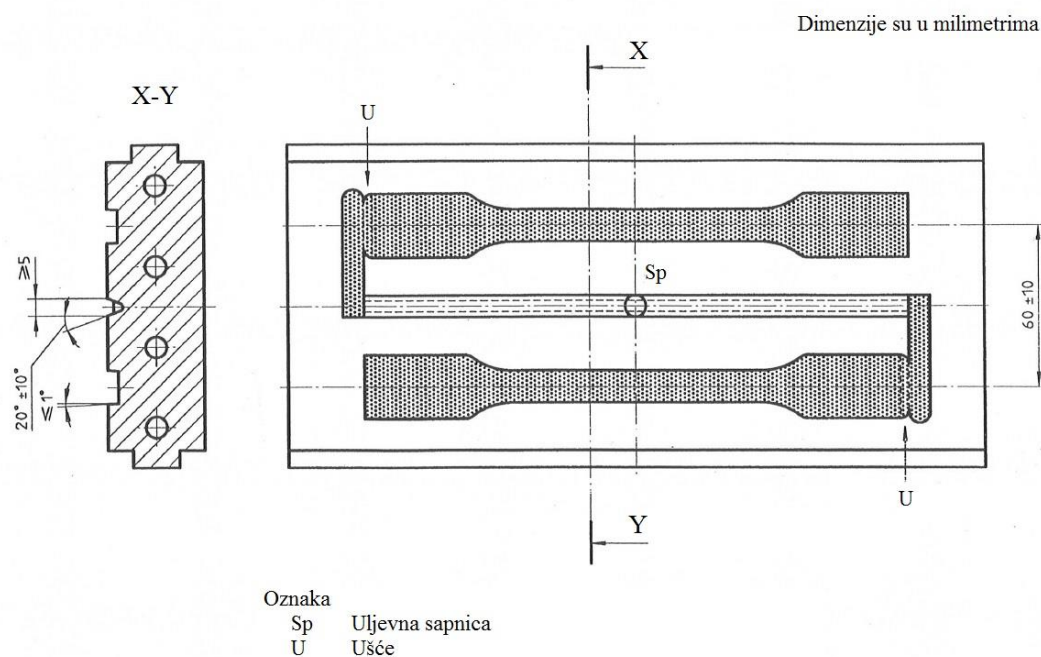


Slika 3.1. Shematski dijagram ciklusa injekcijskog prešanja [15]

3.2.1. ISO KALUPI (S VIŠE KALUPNIH ŠUPLJINA)

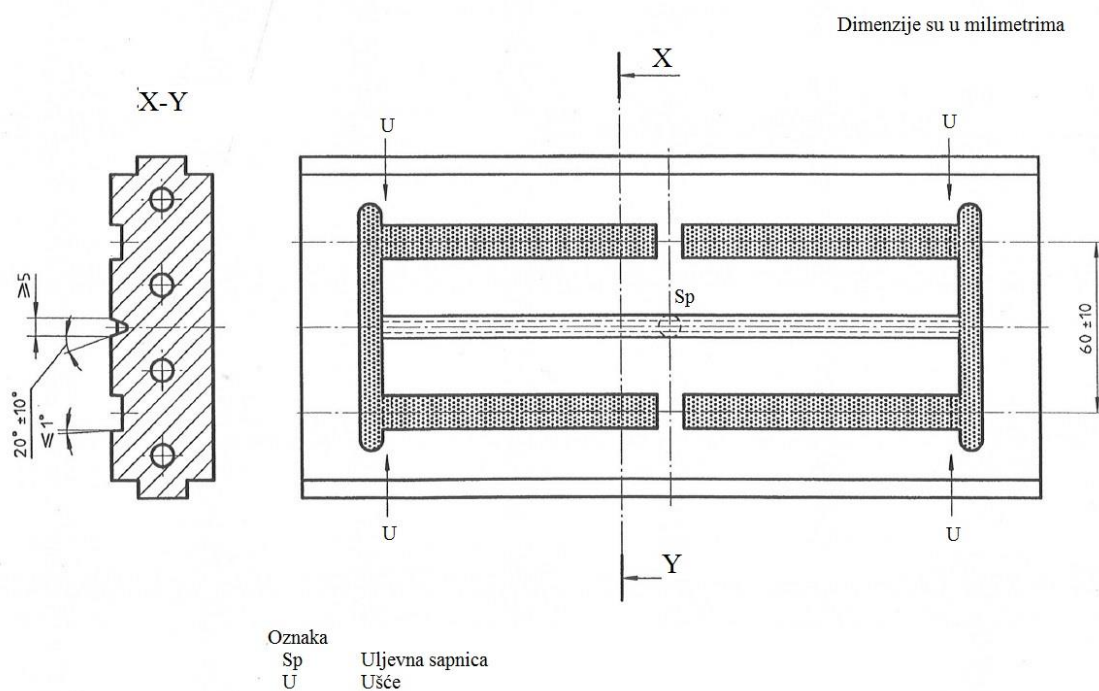
ISO kalupi su izričito napravljeni za proizvodnju ispitnih tijela za prikupljanje podataka koji su namjenjeni za uspoređivanje te za upotrebu u slučaju rješavanja nedoumica vezanih za međunarodne standarde.

Višenamjenska ispitna tijela specificirana u normi ISO 3167 se izrađuju u ISO kalupu tipa A s dvije kalupne šupljine pomoću Z ili T kanala (slika 3.4). Kalup je prikazan na slici 3.2 te mora zadovoljiti točno određene specifikacije. Z kanal je češće upotrebljavan zbog simetričnije sile zatvaranja. Proizvedena ispitna tijela imaju dimenzije tipa A specificirane u normi ISO 3167.



Slika 3.2. Kalupna ploča za ISO kalup tipa A [15]

Pravokutna ispitna tijela 80 mm x 10 mm x 4 mm se izrađuju u ISO kalupu tipa B s četiri kalupne šupljine i duplim T kanalom. Kalup je prikazan na slici 3.3 te također mora zadovoljiti točno određene specifikacije. Proizvedena ispitna tijela za višenamjenska ispitivanja imaju jednake poprečne dimenzije po sredini i duljinu od 80 mm ± 2 mm.

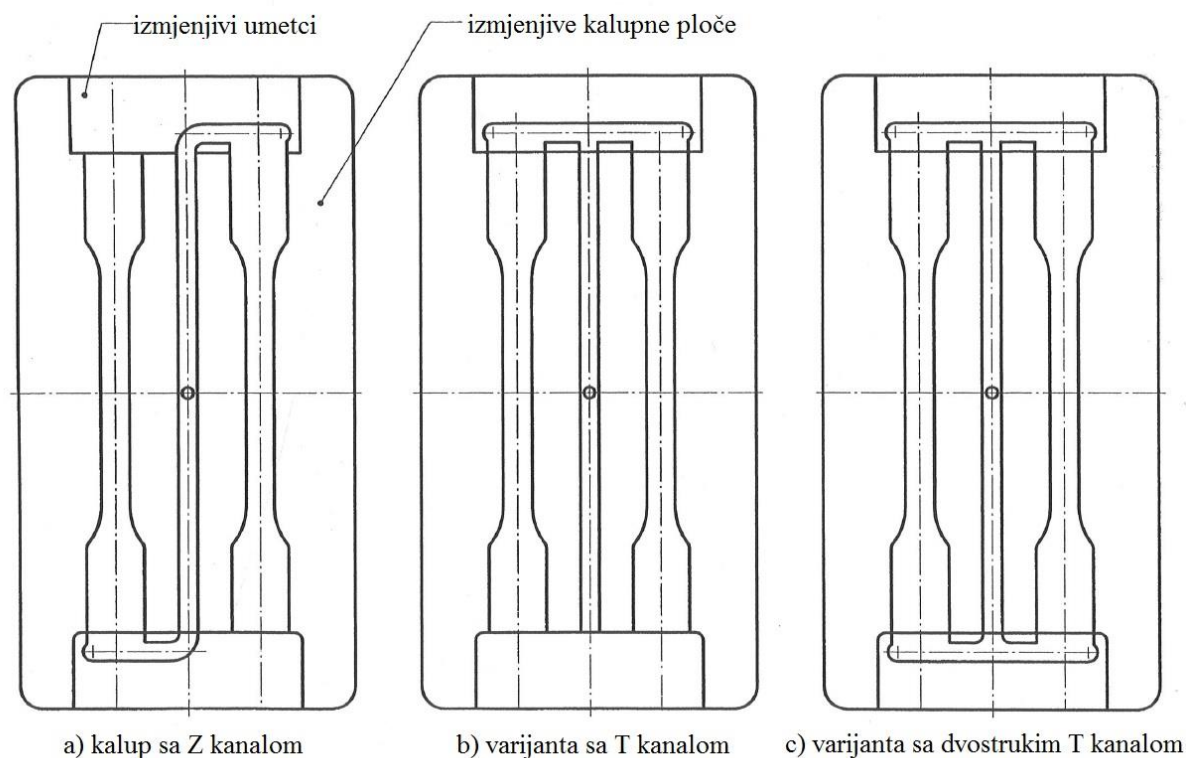


Slika 3.3. Kalupna ploča za ISO kalup tipa B [15]

Glavni konstrukcijski detalji ISO kalupa tipa A i B prikazani na slikama 3.2 i 3.3 moraju zadovoljiti sljedeće specifikacije:

- a) Promjer uljevne sapnice na strani mlaznice mora biti najmanje 4 mm.
- b) Širina i visina (ili promjer) uljevnog kanala mora biti najmanje 5 mm.
- c) Kalupne šupljine moraju imati ušće samo na jednom kraju kao što je prikazano na slikama 3.2 i 3.3.
- d) Visina ušća mora biti najmanje $\frac{2}{3}$ visine kalupne šupljine te širina ušća mora biti jednaka širini kalupne šupljine u točki gdje ušće dodiruje kalupnu šupljinu.
- e) Ušće mora biti što je moguće kraće, a nikako duže od 3 mm.
- f) Kut nagiba uljevnog kanala mora najmanje iznositi 10° , a najviše 30° . Kalupna šupljina ne smije imati kut nagiba veći od 1° osim u područjima ramena ispitnih tijela za ispitivanje vlačne čvrstoće gdje kut nagiba ne smije biti veći od 2° .
- g) Dimenzije kalupnih šupljina moraju biti takve da se dimenzije proizvedenih ispitnih tijela poklapaju sa zahtjevima danim u standardima za relevantne testove. Kako bi dopustili različite postotke skupljanja kalupnih šupljina, dimenzije će biti odabrane tako da su između nominalne vrijednosti i gornje granice specificiranih dimenzija za ispitno tijelo. U slučaju ISO kalupa tipa A i B glavne dimenzije kalupnih šupljina, u milimetrima, moraju biti:
 - dubina: 4,0 do 4,2;
 - širina središnjeg presjeka: 10,0 do 10,2;
 - duljina (kalup tipa B): 80 do 82.
- h) Izbacivači, ako upotrebljeni, moraju biti smješteni izvan područja ispitivanja ispitnih tijela, npr. na ramenima zvonolikih ispitnih tijela napravljenih iz kalupa tipa A ili izvan 20 mm središnjeg dijela štapićastih ispitnih tijela napravljenih iz kalupa tipa B.
- i) Sustav hlađenja i zagrijavanja kalupnih ploča treba biti konstruiran tako da u radnim uvjetima razlika temperature bilo koje točke na površini kalupnih šupljina i ploče je manja od 5° .
- j) Izmjenjive ploče s kalupnim šupljinama i umetci su preporučeni da spriječe brze promjene u proizvodnji između različitih vrsta ispitnih tijela.
- k) Preporučeno je da senzor tlaka bude smješten u središnji uljevni kanal kako bi dao potpunu kontrolu vremena ubrizgavanja.
- l) Kako bi osigurali izmjenjivost kalupnih ploča između različitih ISO kalupa važno je paziti na sljedeće konstrukcijske detalje uz one prikazane na slikama 3.2 i 3.3:

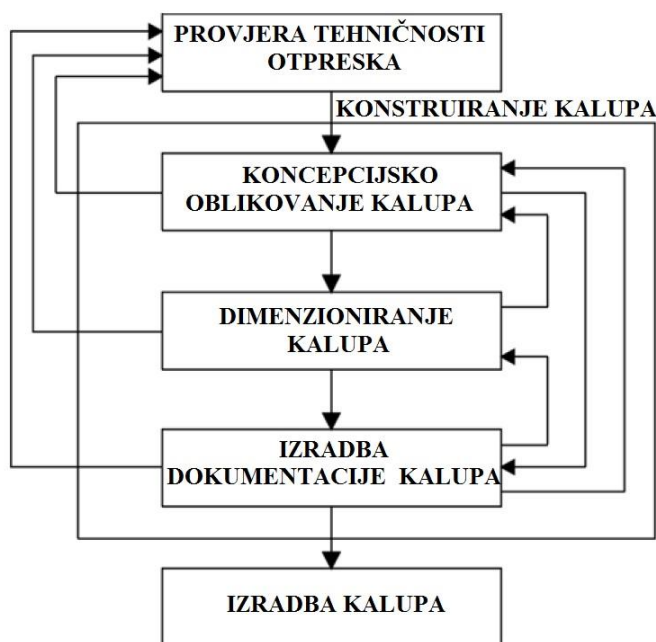
- Preporučeno je da duljina šupljine bude 170 mm za injekcijsko prešanje višenamjenskih ispitnih tijela u ISO kalupu tipa A. To iznosi maksimalnih 180 mm duljine za razmak između kalupnih ploča.
 - Minimalni razmak između priključnih točaka za kanale sustava za zagrijavanje i hlađenje može utjecati na širinu kalupnih ploča. Uz to, moguće je da će biti potreban prostor u ISO kalupu tipa B za smještaj posebnih dodataka koji omogućuju izradu zarezanih ispitnih tijela za upotrebu u ISO 179.
 - Linije po kojima ispitna tijela mogu biti odrezana od uljevaka mogu biti definirana, npr. da su razmaka 170 mm za ISO kalup tipa A i B. Drugi par linija od 80 mm razmaka mogu biti definirane za rezanje štapića od višenamjenskih ispitnih tijela iz ISO kalupa tipa A te se mogu upotrijebiti i za rezanje kalupa manjih ploča.
- m) Kako bi lakše provjerili identičnost svih ispitnih tijela iz kalupa, preporučeno je da svaka kalupna šupljina bude označena, ali izvan područja ispitivanja ispitnih tijela. Ovo se može izvesti jednostavnim graviranjem prikladnih simbola na čelo izbacivača, te time izbjeći bilo kakvu štetu na površini kalupne ploče.
- n) Nesavršenstva površine mogu utjecati na rezultate, pogotovo mehaničkih ispitivanja. Kada je prikladno, površine kalupnih šupljina treba ispolirati, tako da smjer poliranja odgovara smjeru opterećenja pri ispitivanju ispitnih tijela.



Slika 3.4. Različite konfiguracije umetaka [15]

3.3. TEMELJNE FAZE KONSTRUIRANJA KALUPA

Kako bi se proces konstruiranja kalupa za injekcijsko prešanje plastomera podigao na kvalitativno višu razinu, potrebno je načiniti raščlambu čitavog procesa konstruiranja na odgovarajuće faze, a unutar svake faze razraditi potrebne aktivnosti. Općenito, tijekom konstruiranja kalupa za injekcijsko prešanje plastomera moguće je grubo podijeliti u tri temeljne faze. To su faza razrade koncepcije kalupa, faza dimenzioniranja elemenata kalupa (proračun kalupa), te faza izradbe dokumentacije kalupa (slika 3.5). [16,17]



Slika 3.5. Temeljne faze konstruiranja kalupa za injekcijsko prešanje [10]

3.4. TOLERANCIJE KALUPA [1]

Pri izradbi kalupa potrebne su također određene tolerancije. Raznim normama predviđene su različite veličine tolerancije izradbe kalupa, koje iznose 30 do 40 % ukupne tolerancije otpreska. Mogućnost postizanja tolerancije kalupa izravno je povezana s opremljenosti alatnica. Za precizna otpreske potrebni su i precizni kalupi.

Višekratno je ispitivana primjenjivost *Đuraševićeve* opće teorije sklapanja u alatničarstvu koja predviđa propisivanje potrebne zračnosti ili prekomjere dosjeda. Na temelju provedenih istraživanja aklučeno je da se programiranim sklapanjem dijelova kalupa postižu precizniji sklopovi. Što je više dijelova u sklopu, to su tolerancije sklopa uže, uže od tolerancija pojedinačnih dijelova.

3.5. DODATCI KALUPU [14]

Razlikuju se tri skupine dodatka kalupu: jezgre (školjke), metalni dijelovi i ukrasi (tablica 3.1).

Tablica 3.1. Dodatci kalupu [14]

<i>Jezgra (školjka)</i>	bez (jezgre)
	taljiva
	topiva
<i>Montažni dio</i>	umetak
	nametak
<i>Ukras</i>	bez (ukrasa)
	etiketa
	list
	tkanina
	trodimenzionalni (ukras)
	ostalo

Primjeri:

- *Jezgra (školjka)*: injekcijsko oprešavanje s uklonjivim taljivim jezgrama
- *Montažni dio*: injekcijsko prešanje s umetkom
- *Ukrasi*: dekoracijsko injekcijsko prešanje na tkaninu uz posebni ukras

3.6. POSTUPCI PROIZVODNJE KALUPA [1]

U proizvodnji kalupa za injekcijsko prešanje plastomera moguće je razlikovati dvije osnovne skupine postupaka pravljenja pojedinih dijelova. To su uobičajeni, klasični postupci izradbe dijelova i sve učestaliji postupci brze proizvodnje kalupa.

Uobičajene, klasične postupke moguće je također podijeliti u dvije skupine. Prvu skupinu čine standardni postupci odvajanjem čestica, kao što su: tokarenje, glodanje, bušenje, blanje, rezanje, brušenje itd. Za izradnu prodora upotrebljava se elektroerodiranje, dok se za izradbu finih gravura rabi kemijsko erodiranje, nagrivanjem metala kiselim ili lužnatim otopinama. To su specijalni postupci obradbe odvajanjem čestica.

Drugu skupinu čine postupci preoblikovanja, praoblikovanja i nanošenja. Za izradbu većeg broja istovrsnih gnijezda pokazalo se pogodnim hladno utiskivanje. Gnijezda se izrađuju i taloženjem: toplim utiskivanjem (lijevani metali pritiskuju se tijekom hlađenja) i elektrokemijskim nanošenjem, što je čest slučaj pri izradbi finih gravura ili kompliciranih oblika, kao što su dječje igračke (lutke i sl.).

Završna obradba površina u dodiru s plastomerom obavlja se u pravilu glačanjem brusnim papirima i pastama za poliranje te pjeskarenjem ako se traže zagasite, mat površine.

4. ISPITNO TIJELO

4.1. PRIPREMA ISPITNIH TIJELA [2]

Normizacija i jamstvo kvalitete materijala temelje se na brojnim metodama ispitivanja i karakterizacije materijala, te organizaciji informacijskih sustava o materijalima. Osim normiranih mjernih metoda za granična mehanička i toplinska svojstva, kemijsku i biološku postojanost itd., raspoložive su i brojne nerazorne metode ispitivanja strukture i svojstva materijala (spektroskopske metode itd.). Mnoge normirane metode ispitivanja zahtijevaju i normirana ispitna tijela, ispitke. Postupci proizvodnje i pripreme ispitaka ovise o brojnim utjecajnim čimbenicima, uključujući vrstu polimera i oblik u kojem je materijal dostupan. U slučaju krute plastike, ispitci se mogu načiniti injekcijskim prešanjem. U tom se slučaju može pojaviti nehomogenost strukture i orijentiranost svojstva.

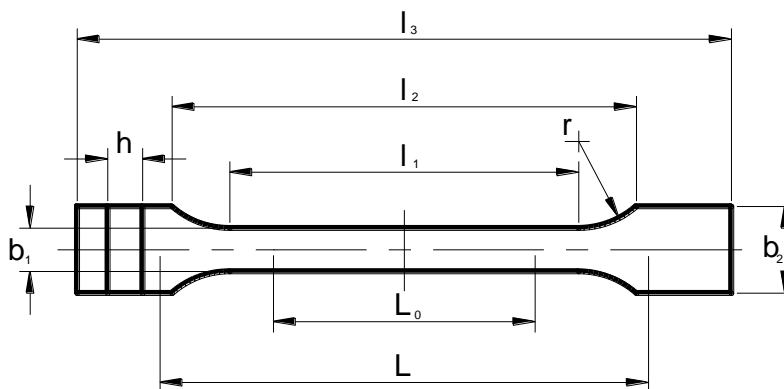
Izravno i posredno prešanje postupci su koji osiguravaju homogen i izotropan ispitak. Osim toga, ispitci se mogu načiniti i obradom odvajanjem čestica. U slučaju savitljive plastike, ploča, folija i filmova, ispitak se pravi istijecanjem ili izrezivanjem.

4.2. NORMA ISO 527 – 2: 1993 [19]

Prema normama ISO 527 – 2: 1993 ispitno tijelo je bučićastog oblika. Postoje dva osnovna tipa:

- 1A – za višenamjensko ispitivanje
- 1B – za strojna ispitna tijela.

Na slici 4.1 prikazan je oblik ispitnog tijela.



Slika 4.1. Oblik ispitnog tijela [19]

Tablica 4.1 prikazuje dimenzije ispitnog tijela 1A i 1B.

Tablica 4.1. Dimenzije ispitnog tijela 1A i 1B [19]

Tip ispitnog tijela	Dimenzije [mm]	
	1A	1B
l_3 – ukupna duljina	$\geq 150^{(1)}$	
l_1 – duljina uskog paralelnog dijela	80 ± 2	$60 \pm 0,5$
r – polumjer	20-25	$\geq 60^{(4.1)}$
l_2 – udaljenost između proširenog paralelnog dijela	$104-113^{(3)}$	$106-120^{(3)}$
b_2 – širina pri kraju	$20 \pm 0,2$	
b_1 – širina uskog dijela	$10 \pm 0,2$	
h – debljina	$4 \pm 0,2$	
L_0 – mjerna duljina	$50 \pm 0,5$	
L – početna udaljenost između ispitivanja	115 ± 1	l_{20}^{+5}

(1) Za neke materijale duljina se mora povećati (npr. $l_3 = 200$ mm) da se izbjegne lomljenje ili klizanje u čeljustima kidalice.

$$r = \frac{[(l_2 - l_1)^2 + (b_2 - b_1)^2]}{4 \cdot (b_2 - b_1)} \quad (4.1)$$

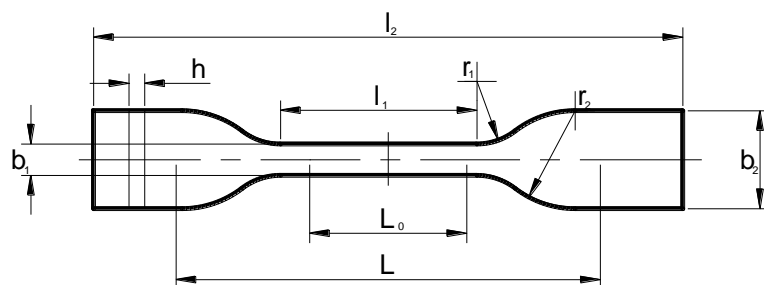
(3) U zavisnosti o l_1 , r , b_1 i b_2 , ali u granicama tolerancije.

Za male ispitke rabe se tipovi 1BA i 1BB. Njihove dimenzije prikazane su u tablici 4.2.

Tablica 4.2. Dimenzije ispitnog tijela 1BA i 1BB [19]

Tip ispitnog tijela	Dimenzije [mm]	
	1BA	1BB
l_3 – ukupna duljina	≥ 75	≥ 30
l_1 – duljina uskog paralelnog dijela	$30 \pm 0,5$	$12 \pm 0,5$
r – polumjer	≥ 30	≥ 12
l_2 – udaljenost između proširenog paralelnog dijela	58 ± 2	23 ± 2
b_2 – širina pri kraju	$10 \pm 0,5$	$4 \pm 0,2$
b_1 – širina uskog dijela	$5 \pm 0,5$	$2 \pm 0,2$
h – debljina	≥ 2	≥ 2
L_0 – mjerna duljina	$25 \pm 0,5$	$10 \pm 0,2$
L – početna udaljenost između ispitivanja	l_{20}^{+2}	l_{20}^{+1}

Za neke specijalne slučajeve primjenjuju se tipovi 5A i 5B. Specijalni oblik ispitnog tijela vidi se na slici 4.2.



Slika 4.2. Specijalni oblik ispitnog tijela [19]

U tablici 4.3 prikazane su dimenzije ispitnog tijela 5A i 5B.

Tablica 4.3. Dimenzije ispitnog tijela 5A i 5B [19]

	Dimenzije [mm]	
Tip ispitnog tijela	5A	5B
l_2 – ukupna duljina	≥ 75	≥ 35
b_2 – širina pri kraju	$12,5 \pm 1$	$6 \pm 0,5$
l_1 – duljina uskog paralelnog dijela	25 ± 1	$12 \pm 0,5$
b_1 – širina uskog dijela	$4 \pm 0,1$	$2 \pm 0,1$
r_1 – mali polumjer	$8 \pm 0,5$	$3 \pm 0,1$
r_2 – veliki polumjer	$12,5 \pm 1$	$3 \pm 0,1$
L – početna udaljenost između ispitivanja	50 ± 2	20 ± 2
L_0 – mjerna duljina	$20 \pm 0,5$	$10 \pm 0,2$
h – debljina	≥ 2	≥ 1

5. POSTUPCI ISPITIVANJA MEHANIČKIH SVOJSTAVA

Znanje o svojstvima materijala neophodno je iz više razloga: konstruiranja, kontrole kvalitete, analize loma te radi razumijevanja strukture i ponašanja novih materijala. Specifične ispitne procedure razvijaju se za svaki razred materijala. Ove procedure su općenito one koje najviše odgovaraju genetičkim karakteristikama razreda materijala te njihova upotreba pomaže doprinijeti najznačajnijim rezultatima i dopušta usporedbu podataka iz različitih izvora. Plastika nije nikakav izuzetak. [20]

5.1. MEHANIČKA SVOJSTVA OTPRESKA

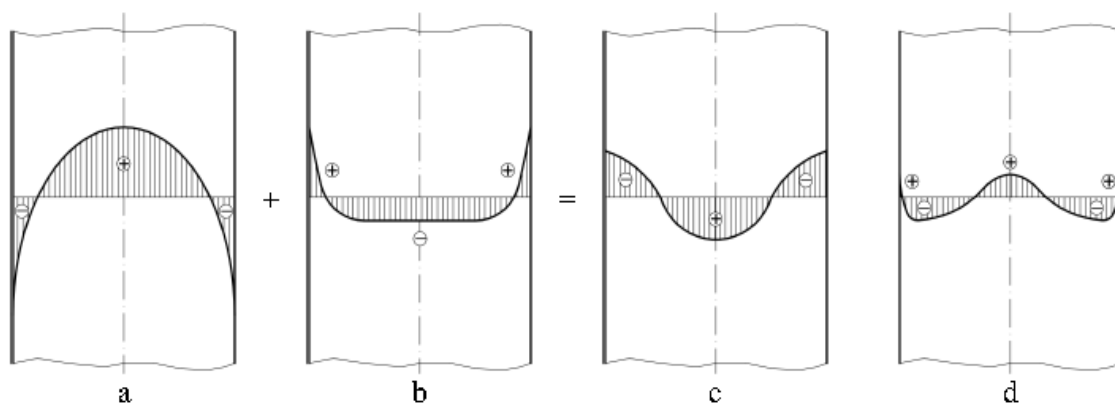
Mehanička svojstva otpreska ne ovise samo o kemijskoj strukturi plastomera, već na njih bitno utječu i parametri preradbe. Gotovo sva mehanička svojstva otpresaka načinjenih od istoga plastomernog materijala mogu se mijenjati promjenom parametara injekcijskog prešanja. Većina svojstava koja utječu na kvalitetu otpreska uglavnom su odraz unutrašnje strukture materijala otpreska. [5]

Najvažnije strukturne karakteristike plastomera koje su ovisne o parametrima preradbe su: orijentacija makromolekula, orijentacija punila i ojačavala (ukoliko su prisutna), zaostala naprezanja, kristalnost strukture i stupanj kristalnosti. [5]

Mehanička svojstva otpreska izravno su ovisna o stupnju i smjeru orijentacije molekula materijala otpreska. Općenito vrijedi pravilo kako su mehanička svojstva viša u smjeru tečenja, a niža u smjeru okomitom na smjer tečenja. Orijentiranost se smanjuje s povećanjem puta tečenja. U blizini ušća naknadni tlak može uzrokovati lagani porast stupnja orijentacije u središtu presjeka otpreska. Orijentacija uglavnom ovisi o temperaturi taljevine i profilu brzine čela taljevine. Orijentacija amorfних i kristalastih plastomera je različita. Veći iznosi stezanja javljaju se pri preradbi kristalastih plastomera, pa je nužno dodavanje veće količine taljevine tijekom faze djelovanja naknadnog tlaka. Dodavanje taljevine povisuje stupanj orijentacije posebice kroz središte presjeka otpreska. Brzina čela taljevine također utječe na orijentaciju. Pri visokim brzinama ubrizgavanja ostvaruje se veći stupanj orijentacije. [4]

Zaostala naprezanja su mehanička naprezanja prisutna u otpresku bez djelovanja vanjskog opterećenja (slika 5.1). Ona su rezultat različitih temperaturnih profila u otpresku tijekom hlađenja, što uzrokuje deformacije kutova atomskih veza u makromolekulama. Površinski sloj se brzo hladi

i očvršćuje čineći krutu ljusku koja sputava stezanje još uvijek vrućih unutrašnjih slojeva tijekom njihova hlađenja. Takvo stanje rezultira rasteznim naprezanjima u unutrašnjosti otpreska te pritisnim naprezanjima na vanjskim dijelovima otpreska. Deformacije koje uzrokuju zaostala naprezanja uglavnom su energijsko-elastične prirode. [4,5,21]



Slika 5.1. Napetosti u pločastom otpresku: a - zbog uvjeta zagrijavanja ili hlađenja, b - zbog uvjeta tečenja, c - zbog djelovanja unutarnjeg tlaka, d - ukupne (superponirane) napetosti [21]

Zaostala naprezanja predstavljaju mehaničko preopterećenje otpresku i imaju bitan utjecaj na uporabljivost otpreska, dimenzijsku stabilnost, čvrstoću i kemijsku postojanost. [4,21]

Temperatura stijenke kalupne šupljine ključan je parametar za pojavu zaostalih naprezanja u otpresku. Niže temperature stijenke kalupne šupljine pogoduju pojavi povišenih zaostalih naprezanja u otprescima. Vrijeme hlađenja bitno utječe na profil zaostalih naprezanja u otpresku. Skraćivanje vremena hlađenja smanjuje razinu zaostalih naprezanja. Razlog djelomično leži u činjenici da otpresak što je više temperature pri vađenju iz kalupne šupljine, to mu je omogućena bolja relaksacija makromolekula. Drugi razlog je ranije vađenje otpreska iz kalupne šupljine koje rezultira bržim uravnoteženjem profila temperatura po presjeku otpreska, pa zaostala naprezanja nastaju uslijed manjih temperaturnih razlika. Debljina stijenke otpreska također bitno utječe na profil zaostalih naprezanja. Otpresci tanjih stijenki hlade se brže od debljih, pa se u njima razvijaju veći temperaturni gradijenti koji uzrokuju više vrijednosti zaostalih naprezanja. Deblji otpresci također omogućuju bolje uvjete za relaksaciju naprezanja. [4]

Vršna vrijednost tlaka tijekom stlačivanja i prekomjeran naknadni tlak u kalupnoj šupljini uzrokuju stlačivanje i preopterećenje u središnjem dijelu presjeka otpreska. U takvim slučajevima otpresak

se vadi iz kalupne šupljine s povišenim tlakom u njegovoj unutrašnjosti. Takvo stanje dovodi do pojave *napetosti uslijed stlačivanja* u kalupu. [5]

Pri preradbi kristalastih plastomera postiže se sređenija struktura molekula na mikro razini. Takve skupine sređenih makromolekula nazivaju se kristalitima. Stupanj kristalnosti može se definirati kao omjer kristaliziranog materijala prema materijalu koji je bio sposoban kristalizirati. Stupanj kristalnosti definira nekoliko svojstava otpreska. Postoji izravna veza između stupnja kristalnosti i mase otpreska, rastezne čvrstoće, modula elastičnosti i žilavosti koji rastu proporcionalno s porastom stupnja kristalnosti. [4]

Stupanj kristalnosti ovisi prvenstveno o molekularnoj strukturi, no na njega je moguće utjecati i s pomoću parametara preradbe te naknadnom obradbom. Na stupanj kristalnosti najveći utjecaj ima temperatura stijenke kalupne šupljine. Viša temperatura stijenke kalupne šupljine pogoduje postizanju višeg stupnja kristalnosti. Viša brzina hlađenja uzrokuje postizanje manjeg stupnja kristalnosti. U tom je slučaju moguće očekivati naknadnu kristalizaciju koja ima utjecaj na svojstva otpreska i njegove izmjere. [4]

Debljina stijenke otpreska utječe na postizanje određenog stupnja kristalnosti. Kako se deblji otpresci hlade sporije, u njihovoj strukturi postiže se viši stupanj kristalnosti nego li u slučaju tankostjenih otpresaka. [4]

Tijekom faze ubrizgavanja najjači je utjecaj tlaka u kalupnoj šupljini na postizanje kvalitete površine otpreska, orijentiranost molekula, te postignuti stupanj kristalnosti. Ta faza ujedno definira i razinu toplinskih i mehaničkih opterećenja taljevine. Tijekom faze stlačivanja bitno se utječe na oblikovanje otpreska i poprimanje svih detalja kalupne šupljine. Tijekom te faze također je moguća pojava srha, te oštećenja kalupa. Faza djelovanja naknadnog tlaka usko je povezana s postizanjem odgovarajuće mase otpreska, kao i s odgovarajućom dimenzijskom stabilnošću otpreska. Tijekom te faze također se utječe na postizanje orijentacije strukture i na postignuti stupanj kristalnosti, ali u manjoj mjeri nego li tijekom ubrizgavanja. Moguće je zaključiti kako se u svim fazama ciklusa injekcijskog prešanja može utjecati na mehanička svojstva otpreska. [5]

Temperatura stijenke kalupne šupljine, ukupno gledajući, smatra se najutjecajnijim parametrom preradbe injekcijskim prešanjem na svojstva otpreska (tablica 5.1). [3]

Temperatura stijenke kalupne šupljine ovisi o toplinskim svojstvima materijala elemenata koji oblikuju kalupnu šupljinu i izmjerama kanala za temperiranje. Također je dinamička funkcija temperature taljevine, temperature okoline te temperature i brzine medija za temperiranje, kao i vremena hlađenja otpreska i vremena ciklusa injekcijskog prešanja. [3,7]

Tablica 5.1. Utjecaj temperature stijenke kalupne šupljine na neka svojstva otpreska [3]

Utjecajna veličina	Porast	Pad
• Temperatura stijenke kalupne šupljine	x	
Zavisne veličine (svojstva otpreska)		
• Napetosti		x
• Kristalnost	x	
• Naknadno skupljanje		x
• Toplinska postojanost	x	
• Orijentacija		x
• Vrijeme djelovanja naknadnog tlaka	x	
• Vrijeme pečenja ušća	x	
• Vrijeme hlađenja (ciklusa)	x	

Stohastičnost temperature stijenke kalupne šupljine očituje se u činjenici kako postoji samo stanovita vjerojatnost da se postignuta temperatura i zadrži u idućem ciklusu, što zahtijeva mjerenje temperature stijenke kalupne šupljine. Pokusi su pokazali kako se najbolji rezultati postižu ako se osjetilo temperature postavlja na površini ili neposredno ispod površine stijenke kalupne šupljine. [3,7]

Tlak u kalupnoj šupljini sljedeći je utjecajni čimbenik na svojstva otpreska. Ispravan tijek tlaka u kalupnoj šupljini i njegova kontrola tijekom preradbe postiže se mjerenjem i registriranjem. Stoga se u kalup ugrađuju osjetila tlaka. Tlak u kalupnoj šupljini moguće je mjeriti izravno ili posredno. [3,5,22]

5.2. POSTUPCI ISPITIVANJA [2]

Normizacija i jamstvo kvalitete materijala temelje se na brojnim metodama ispitivanja i karakterizacije materijala, te organizaciji informacijskih sustava o materijalima. Osim normiranih mjernih metoda za granična mehanička i toplinska svojstva, kemijsku i biološku postojanost itd., raspoložive su i brojne nerazorne metode ispitivanja strukture i svojstva materijala (spektroskopske metode itd.). Mnoge normirane metode ispitivanja zahtijevaju i normirana ispitna tijela, ispitke. Postupci proizvodnje i pripreme ispitaka ovise o brojnim utjecajnim čimbenicima,

uključujući vrstu polimera i oblik u kojem je materijal dostupan. U slučaju krute plastike, ispiti se mogu načiniti injekcijskim prešanje. U tom se slučaju može pojaviti nehomogenost strukture i orijentiranost svojstva.

Pri konstrukcijskoj primjeni polimernih materijala posebno su zanimljiva mehanička svojstva. Ona se određuju brojnim statističkim i dinamičkim ispitivanjima. Kako bi se pri ispitivanjima uklonio utjecaj geometrije ispitivanog tijela, ispituju se epruvete (ispitno tijelo, ispitak) propisanog oblika. Većina normiranih ispitivanja mehaničkih svojstava izvodi se na univerzalnom ispitnom uređaju, tzv. kidalici. Jedan od mogućih načina podjele mehaničkih svojstava prikazan je u tablici 5.2.

Tablica 5.2. Pregled mehaničkih svojstava [2]

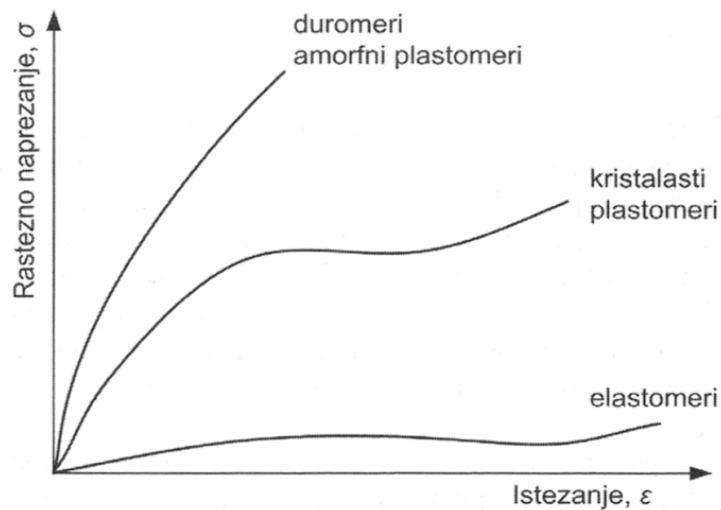
MEHANIČKA SVOJSTVA			
KRATKOTRAJNA SVOJSTVA		DUGOTRAJNA SVOJSTVA	
Udarno opterećenje	Statičko opterećenje	Statičko opterećenje	Dinamičko opterećenje
- žilavost	- čvrstoća - modul elastičnosti - tvrdoća	- statička izdržljivost (puzanje)	- dinamička izdržljivost (zamor materijala)

Podjela svojstava kao u tablici 5.2 načinjena je na temelju činjenica da su mehanička svojstva ovisna o utjecaju unutarnjih i vanjskih čimbenika, o trajanju opterećenja te o načinu i brzini djelovanja opterećenja.

5.2.1. KRATKOTRAJNA MEHANIČKA ISPITIVANJA

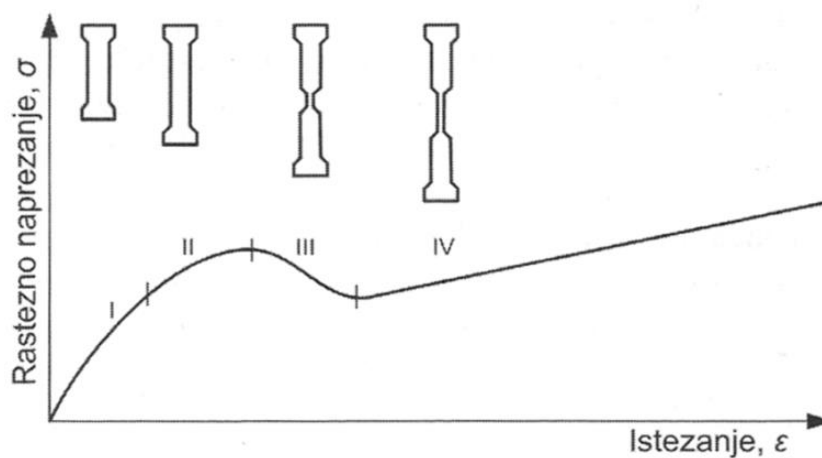
Kao kratkotrajno opterećenje definira se ono opterećenje pri kojem od početka ispitivanja (opterećivanja) pa do kraja ispitivanja (opterećivanja), odnosno loma ne prođe niti znatno više niti znatno manje od jedne minute. Iz te definicije proizlazi ovisnost mehaničkih svojstava o trajanju opterećenja.

Budući da su za primjenu polimera mehanička svojstva vrlo važna, potrebno je najprije prikazati karakteristične dijagrame “naprezanje-deformacija” pri rasteznom (kratkotrajnom statičkom) opterećenju osnovnih skupina polimera (slika 5.2).



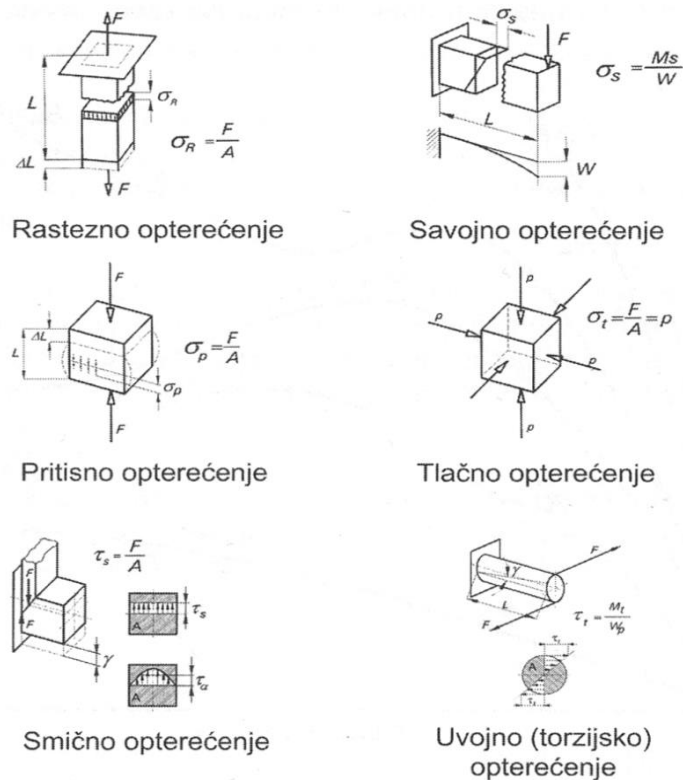
Slika 5.2. Karakteristični dijagrami rastezno naprezanje-istezanje osnovnih skupina polimernih materijala [2]

Karakteristično ponašanje polimernih materijala, osobito onih s lančastim (linearnim) makromolekulama zorno prikazuje raščlanjeni dijagram *rastezno naprezanje-istezanje* na slici 5.3.



Slika 5.3. Raščlanjeni dijagram rastezno naprezanje-istezanje kristalastih plastomera [2]

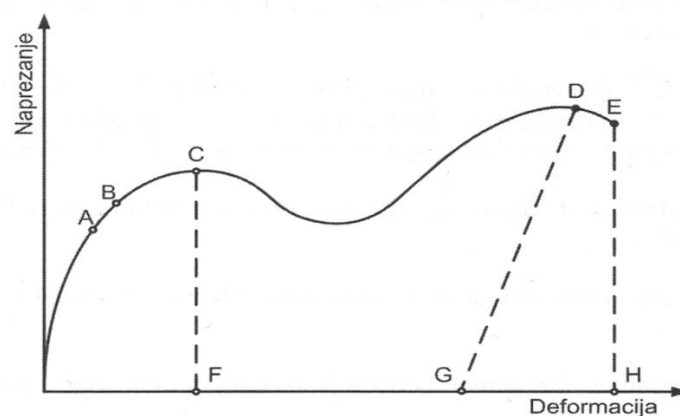
U praksi je najčešće ispitivanje rastezanjem i na njemu se temelje sve definicije čvrstoća i deformacija, ali su moguća i ostala opterećenja (slika 5.4).



Slika 5.4. Vrste opterećenja tijela [2]

Epruveta se upne u kidalici i mjeri se sila i produljenje pa se preračunavanjem sile na jedinicu ploštine presjeka određuju naprezanja (slika 5.5):

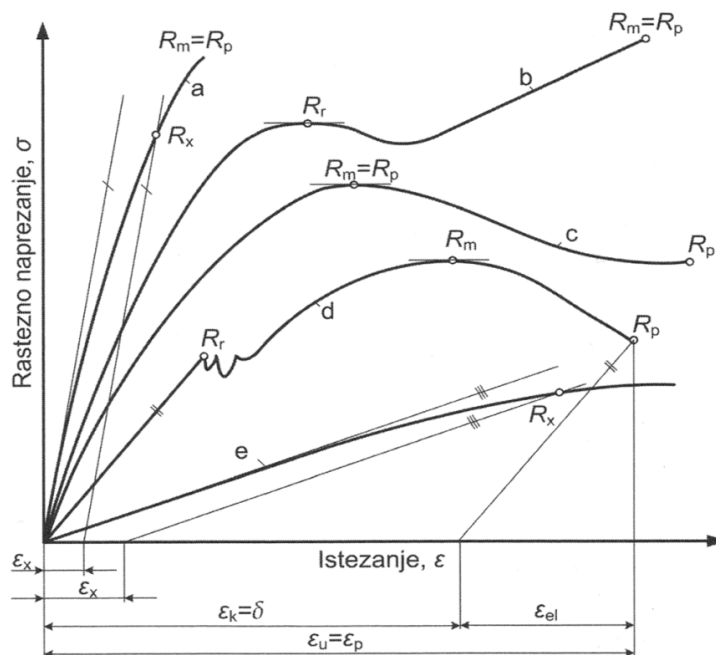
- granica razvlačenja (R_r)
- rastezna (vlačna) čvrstoća (R_m)
- prekidna čvrstoća (R_p).



Slika 5.5. Opći dijagram naprezanje-deformacija: A – granica proporcionalnosti, B – granica elastičnosti, C – granica tečenja, D – čvrstoća pri djelovanju maksimalnog opterećenja, E – nominalno naprezanje pri djelovanju sile koj razdvaja dijelove ispitka, F – deformacija pri granici tečenja, G – trajna deformacija po rasterećenju, H – ukupna deformacija [2]

U slučaju rasteznog opterećenja, u odnosu prema početnoj duljini određuje se prekidno (ukupno) istezanje (E_p).

Na slici 5.6 prikazano je nekoliko tipičnih oblika krivulja *rastezno naprezanje-istezanje* za različite materijale.



Slika 5.6. Vrste krivulja pri ispitivanju rastezanjem: a – sivi lijev ili PS, PMMA, UP; b – PE-LD; c – PA ili PE; d – niskougljični čelik; e – Al, Cu, PA [2]

Granica razvlačenja je naprezanje što ga izaziva sila razvlačenja na početnu ploštinu presjeka epruvete ($R = F/A$). Pri djelovanju sile na granici razvlačenja F_r , već i pri malom povećanju istezanja dolazi do smanjenja sile, a produljenje se neproporcionalno povećava. Ako je R_r istaknut, tangenta na krivulje usporedna je s apscisom.

Konvencionalna granica razvlačenja je naprezanje koje izaziva unaprijed dogovorenu vrijednost trajnog istezanja od x %. Određuje se kod materijala koji ne pokazuju granicu razvlačenja. Dogovorena vrijednost trajnog istezanja kod polimera obično je 0,1 ili 1 % (metala 0,2 %).

Rastezna (vlačna) čvrstoća je naprezanje što ga izaziva maksimalna sila na početnu ploštinu presjeka epruvete ($R_m = F_m/A_0$).

Prekidna čvrstoća je naprezanje što ga izaziva prekidna sila na početnu ploštinu presjeka epruvete ($R_p = F_p/A_0$).

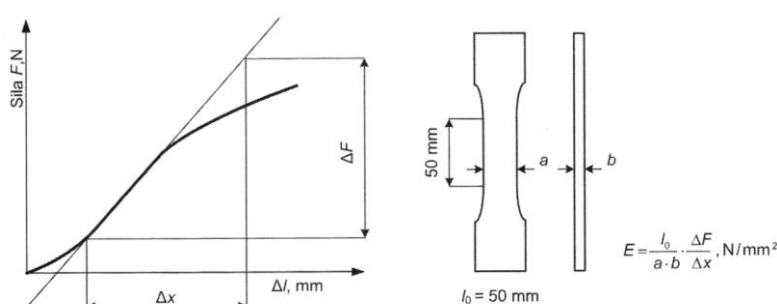
Konačno istezanje, istegnuće, je omjer između konačnog produljenja i početne mjerne duljine epruvete.

Prekidno istezanje je omjer prekidnog (ukupnog) produljenja i početne mjerne duljine epruvete.

Važno su svojstvo i *moduli elastičnosti*. U općem slučaju *modul elastičnosti* je faktor proporcionalnosti i označuje omjer između naprezanja i deformacije ($E = \sigma/\epsilon$).

Najčešće je to *modul rasteznosti* (rastezni modul elastičnosti) (E_r) i *modul smičnosti* (modul elastičnosti pri djelovanju smičnog naprezanja) (G). Valja razlikovati *modul pritiskosti* E_p (pritisni modul elastičnosti, djelovanje jednoosnog pritiskog opterećenja) i *modul stlačivosti* (djelovanje troosnog tlačnog naprezanja $\Delta K = p/V/V_0$).

Postupak određivanja modula elastičnosti polimernih materijala pri rasteznom opterećenju prikazan je na slici 5.7. Radi se o postupnom povećanju opterećenja (sile koja djeluje na ispitak), te određivanju pripadnog produljenja. Crtanjem dijagrama „opterećenje-produljenje“ uočava se linearno područje, odnosno proporcionalni odnos opterećenja i produljenja. Primjenom odgovarajućih izraza mogu se izračunati vrijednosti modula rastezljivosti.



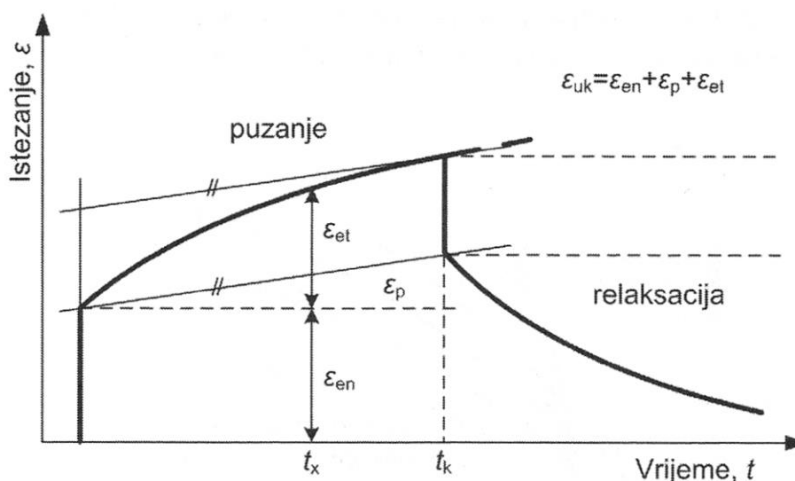
Slika 5.7. Postupak određivanja modula elastičnosti polimernih materijala [2]

5.2.2. DUGOTRAJNA MEHANIČKA ISPITIVANJA

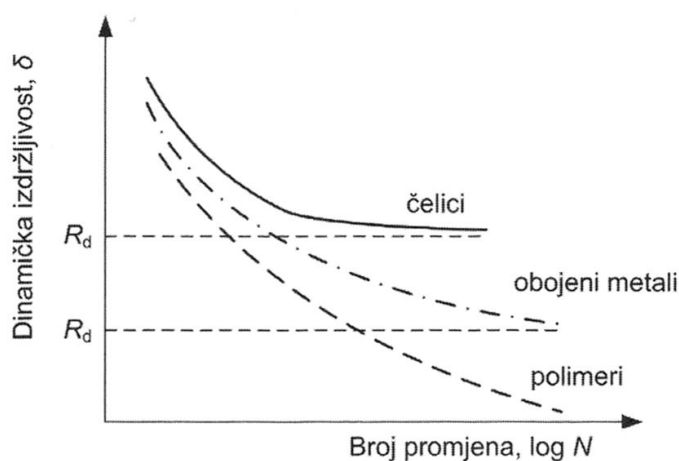
Osim poznavanja ponašanja u uvjetima kratkotrajnog opterećenja, za konstrukcijsku primjenu polimernih materijala važno je poznavanje ponašanja u uvjetima dugotrajnog opterećenja (slike 5.8 i 5.9).

Iz tablice 5.2 proizlazi, pri dugotrajnom opterećenju razlikuje se statičko (dugotrajno nepromjenjivo) i dinamičko (dugotrajno ciklički promjenjivo) opterećenje.

Na slici 5.8 prikazano je ponašanje nekog polimernog materijala pri opterećivanju (puzanje) i nakon rasterećenja (relaksacija odnosno opuštanje).



Slika 5.8. Temeljni prikaz ponašanja polimernih materijala pri dugotrajnom statičkom opterećenju (krivulje puzanja i relaksacije polimernih materijala) [2]



Slika 5.9. Prikaz ponašanja polimernih materijala pri dinamičkom opterećenju [2]

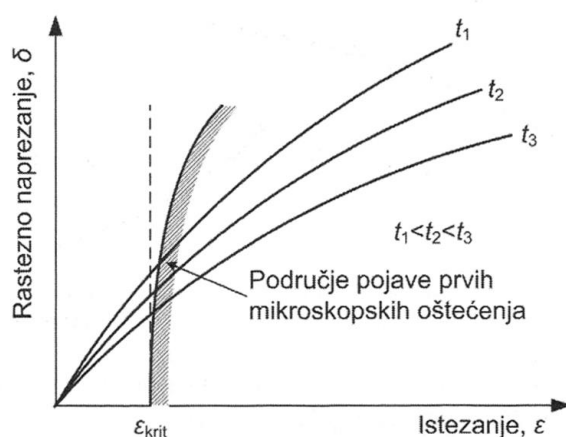
Pri dugotrajnom statičkom opterećenju pojavljuje se *puzanje*, a pri dinamičkom *zamor materijala*. Te se pojave mogu dobro opisati *statičkom* i *dinamičkom izdržljivošću*.

Statička izdržljivost najveće je dugotrajno statičko naprezanje koje materijal može izdržati (bez loma ili doseganja neke granične deformacije) praktički beskonačno dugo, a *dinamička izdržljivost*

najveće dinamičko naprezanje pri kojem materijal može izdržati praktički beskonačan broj ciklusa (bez pojave loma).

Pri dinamičkom opterećenju polimernih materijala preklapaju se mehanički i drugi (npr. toplinski) utjecaji pa je u takvim uvjetima ponašanje polimernih materijala kompleksno. Polimerni materijali uvelike prigušuju vibracije, a to izaziva pojačano generiranje topline. Zbog niske toplinske vodljivosti polimernih materijala povisuje se temperatura materijala. Stoga mehanička svojstva polimernih materijala izravno ovise o temperaturi pa se rezultati ispitivanja polimernih materijala pri dinamičkom opterećenju vrednuju drugačije nego kod drugih materijala. Na slici 5.9 valja uočiti različitost oblika Wöhlerove krivulje (ona omogućuje definiranje dinamičke izdržljivosti materijala) za čelike, obojene metale i polimere. Kao što se vidi na slici, kod polimernih materijala treba uzeti u obzir vremenski faktor i govoriti o *vremenskoj dinamičkoj izdržljivosti*, kojom se označuje izdržavanje materijala samo na određeno vrijeme, odnosno za određeni broj titraja bez puknuća.

Uz Wöhlerovu krivulju za konstrukcijsku primjenu polimernih materijala bitne su informacije koje proizlaze iz izokronih dijagrama *naprezanje-istezanje* (slika 5.10).



Slika 5.10. Izokronni dijagram naprezanje-istezanje [2]

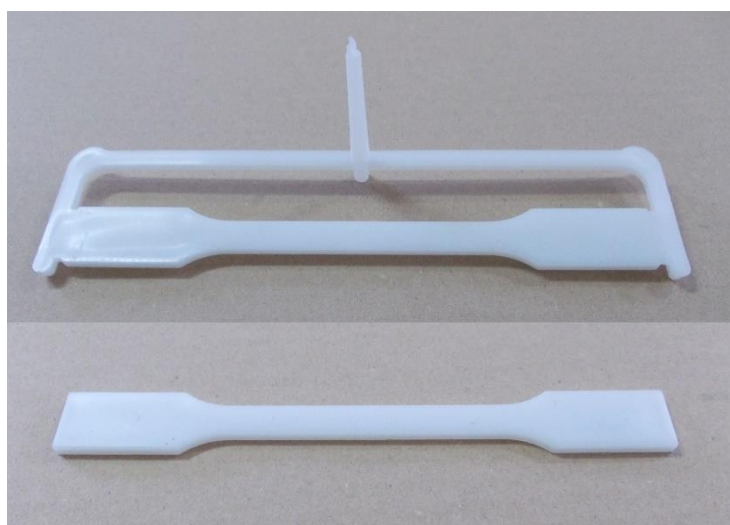
Izokronni dijagrami sadržavaju krivulje ovisnosti *naprezanje-istezanje*, za različita trajanja opterećenja, pri čemu t_1 znači najkraće, a t_2 i t_3 postupno sve duže trajanje opterećenja.

U uvjetima dugotrajnog statičkog opterećenja pri sobnoj, a još prije na povišenim temperaturama, materijal se oštećuje, što je povezano s mogućim pojavama nepravilnosti u građi makromolekulnih struktura.

6. EKSPERIMENTALNI DIO

6.1. CILJ ISTRAŽIVANJA

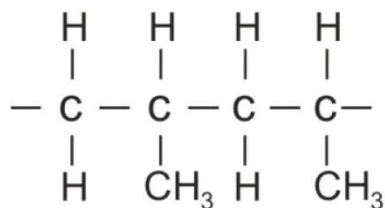
U eksperimentalnom dijelu rada bilo je potrebno, s pomoću faktorskog i centralno-kompozitnog plana pokusa, odrediti najutjecajnije parametre injekcijskog prešanja na rasteznu čvrstoću linije spajanja ispitnih tijela. Također je bilo potrebno i detaljno analizirati utjecaj tih najutjecajnijih parametra na rasteznu čvrstoću linije spajanja. U svrhu dobivanja potrebnih podataka provedeni su pretpokusi i pokus injekcijskog prešanja normiranih ispitnih tijela s pomoću kalupa za injekcijsko prešanje napravljenog prema ISO normama (slika 6.1).



Slika 6.1. Normirano ispitno tijelo

6.2. ISPITNI MATERIJAL I OPREMA

Za ispitni materijal odabran je polipropilen (PP). Polipropilen je kristalasti plastomer (komercijalni polipropilen ima stupanj kristalnosti 60-70 %) linearnih makromolekula s ponavljanim jedinicama $-\text{CH}(\text{CH}_3)-\text{CH}_2-$ (slika 6.2). Ubraja se u tzv. širokoprimjenjive plastomere s godišnjom svjetskom potrošnjom većom od 46 milijuna tona, što ga čini drugim polimerom po proizvodnji i potrošnji u svijetu, odmah iza polietilena. Zbog dobrih svojstava (vrlo niska gustoća, visoka rastezna i pritisna čvrstoća, odlična dielektrična svojstva, postojanost na većinu kiselina, lužina i organskih otapala, neotrovnost, neosjetljivost na vlagu, laka preradljivost) i prihvatljive tržišne cijene, PP se primjenjuje u različitim područjima, od medicine, ambalaže, poljodjelstva, građevinarstva, automobilske i avioindustrije, do izrade namještaja, kućišta kućanskih uređaja, spremnika za vodu i ulje, različitih vrsta cijevi, čamaca itd. [23]



Slika 6.2. Polipropilen (PP) [24]

Svojstva polipropilena možemo vidjeti u tablici 6.1.

Tablica 6.1. Svojstva polipropilena [25]

Svojstvo	Vrijednost	Jedinica
Gustoća	905	kg/m ³
Granica razvlačenja	23	MPa
Tvrdoća	65	Shore D skala
Indeks tečenja taljevine, MFI	10	g/10min
Skupljanje	1,6	%

Pretpokusi i pokus izvedeni su u pogonskim uvjetima. Materijal nije bilo potrebno prethodno sušiti. Korišteno je temperiralo proizvođača *Regloplas* (slika 6.3) za dobivanje potrebne temperature medija za temperiranje, u ovom slučaju ulje, a time i propisanu temperaturu stijenke kalupne šupljine.

Slika 6.3. Temperiralo proizvođača *Regloplas*

Injekcijsko prešanje provedeno je na ubrizgavalici proizvođača *Arburg*, model *Allrounder 305-210-700* (slika 6.4).



Slika 6.4. Ubrizgavalica proizvođača *Arburg*, model *Allrounder 305-210-700*

Tehničke karakteristike navedene ubrizgavalice su dane u tablici 6.2.

Tablica 6.2. Tehničke karakteristike ubrizgavalice *Arburg*, model *Allrounder 305-210-700* [26]

Karakteristika	Vrijednost	Jedinica
Promjer pužnog vijka	30	mm
Obujam ubrizgavanja	103	cm ³
Tlak ubrizgavanja	2050	bar
Sila zatvaranja kalupa	700	kN
Sila ubrizgavanja	145	kN
Vijak motor	280	Nm
Pumpa motor	11	kW
Hod otvaranja kalupa	250	mm
Udaljenost između vodilica	305x105	mm
Min/max ugradbena visina kalupa	400/200	mm

Širina i debljina ispitnih tijela izmjerena je s pomoću digitalne pomične mjerke proizvođača *Micromaster*, razlučivosti 0,001 mm (slika 6.5). Mjerno područje mjerke iznosi od 0 do 30 mm.



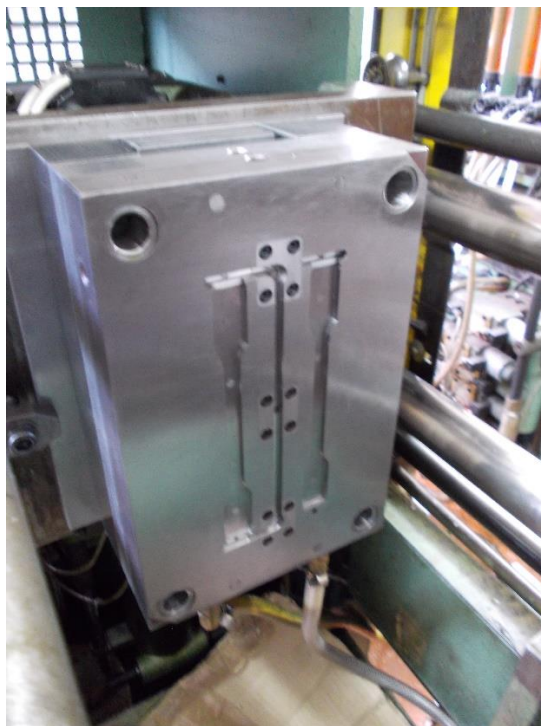
Slika 6.5. Digitalna pomična mjerka proizvođača *Micromaster*

Za mjerenje mase ispitnih tijela upotrebljena je digitalna vaga proizvođača *A&D*, model *EK-600G*, razred točnosti III, podjeljka 0,1 g, maksimalne mjerljive mase do 600 g, prikazana na slici 6.6.



Slika 6.6. Digitalna vaga proizvođača *A&D*

Kako bi se dobila linija spoja na ispitnim tijelima, umetci su u pomičnom dijelu kalupa složeni na način da ulijevni kanal prolazi u oba smjera, tj. umetci su postavljeni u varijantu sa C kanalom. Pomični dio kalupa sa spomenutom konfiguracijom umetaka se nalazi na slici 6.7, dok se na slici 6.8 može vidjeti nepomični dio kalupa.



Slika 6.7. Pomični dio kalupa



Slika 6.8. Nepomični dio kalupa

Mjerenje rastezne čvrstoće napravljeno je s pomoću univerzalne kidalice proizvađača *WPM*, umjerene u I. klasi, sa mjernim područjem od 0 do 4800 N (slika 6.9). Kidalica ima mogućnost opterećenja na vlak, tlak i savijanje, sa minimalnom brzinom od 7 mm/min te maksimalnom do 500 mm/min.



Slika 6.9. Univerzalna kidalica proizvođača WPM

Planovi pretpokusa i pokusa su napravljeni pomoću programa za statističku obradu podataka *Design Expert*. Također su s pomoću istog programa dobiveni rezultati obrađeni i analizirani.

6.3. FAKTORSKI PLAN POKUSA

Najpotpunije obavijesti o proučavanom sustavu, učinak faktora i stupanj interakcije dobiju se primjenom faktorskog planiranja pokusa. Faktorski plan je metoda koja služi pri planiranju pokusa. [27]

U faktorskom planiranju proučava se utjecaj promjene razina različitih faktora na proces. Svako ponovno ispitivanje uzima u obzir sve moguće kombinacije promjena razina faktora. Učinkovito faktorsko planiranje osigurava da se uz najmanji broj provedenih pokusa generira maksimalna količina informacija o tome kako ulazne varijable utječu na izlazne podatke procesa. [28]

Broj izvedenih pokusa ovisi o broju faktora, ako postoje tri faktora tada će broj stanja pokusa biti 2^3 tj. osam stanja pokusa ili ako postoji pet faktora tada će biti 2^5 tj. 32 stanja pokusa i slično. Više od pet faktora se kod potpunog plana ne preporuča zbog obujma pokusa. [28]

Iznos promjena izlaznih podataka procesa uzrokovanih promjenom razine danog faktora naziva se “glavni učinak” faktora. [28]

Broj pokusa potpunih planova eksponencijalno raste s povećavanjem broja čimbenika. Na primjer, za pet čimbenika variranih na dvije razine potrebno je 32 stanja pokusa (2^5), dok je za šest čimbenika potrebno 64 stanja pokusa (2^6). Ako osoba koja provodi eksperimente može pretpostaviti da se određeni utjecaji višeg reda interakcija mogu zanemariti, te da su dovoljne informacije utjecaja glavnih čimbenika i da su za eksperiment dovoljne interakcije nižih redova čimbenika, tada se može koristiti djelomični plan pokusa. [28]

Djelomični plan pokusa je među najčešće korištenim tipovima metoda za planiranje pokusa. Najčešće se koristi kod analitičkih analiza. U tim se eksperimentima uzima u obzir velik broj čimbenika u svrhu utvrđivanja onih čimbenika koji imaju najviše utjecaja. Zato, ukoliko je broj čimbenika relativno velik, željene preliminarne informacije se mogu dobiti upotrebom samo pojedinog dijela potpunog plana, ako se međudjelovanja višeg reda (između više od dva čimbenika) mogu zanemariti. Pri tome se zanemaruju utjecaji međudjelovanja između tri i više čimbenika i promatra se utjecaj samo pojedinačnih čimbenika i eventualnog međudjelovanja prvog reda. Na taj je način moguće odabrati dio potpunog plana i izostaviti određene pokuse. Broj stanja pokusa je u tom slučaju $N = 2^{k-l}$ gdje je k ukupni broj čimbenika i l cijeli broj koji ukazuje na nepotpunost plana. Za $l = 0$, faktorski plan je potpun. U načelu, izabire se $1/2$, $1/4$, $1/8$ itd. potpunog plana, pri čemu izabrani kandidati trebaju biti uravnoteženi i ortogonalni. Pri konstrukciji 2^{k-l} matrice polazi se od 2^k matrice u kojoj je l čimbenika zamijenjena s određenim međudjelovanjima. [28]

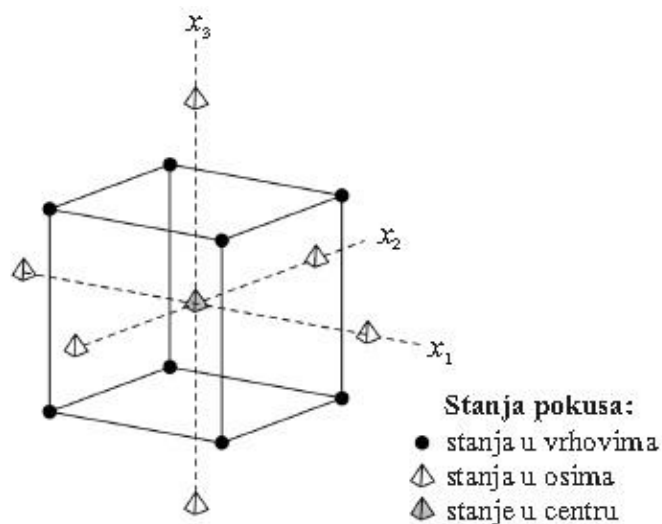
6.4. CENTRALNO-KOMPOZITNI PLAN POKUSA

Ako su proučavani faktori u pokusu doista oni koji utječu na proces, a podaci dobiveni pokusom prihvatljive točnosti i preciznosti, tada je moguće razviti model koji vjerodostojno opisuje proces. Razvojem, tj. dodavanjem centralnog stanja pokusa te stanja pokusa jednako udaljenih od centralne točke (aksijalnih točaka) na postojeći faktorski plan pokusa na dvije razine, formira se centralno-kompozitni plan pokusa. [28]

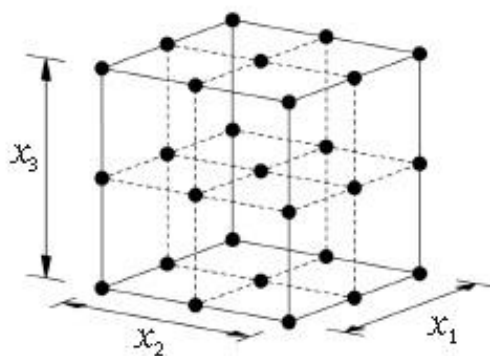
Centralno-kompozitni plan pokusa pripada skupini pokusa višeg reda, tzv. *metodama odzivne površine*. Metoda odzivne površine obuhvaća skup statističkih i matematičkih metoda koje se primjenjuju za razvoj, poboljšanje i optimiranje procesa. Mjerljiva veličina kvalitete proizvoda je *odziv*. Odzivna površina s dovoljnom preciznošću, točnošću i pouzdanošću dopušta predviđanje budućih rezultata u okviru analiziranog područja, te daje uvid u čitav proces. U praksi se pokazalo kako su najčešće dovoljne funkcije odziva prvog i drugog reda. Polinomske aproksimacije pogodne su posebice stoga što omogućuju lagano izračunavanje koeficijenata polinoma, ali se trebaju smatrati samo aproksimacijom stvarne zakonitosti i to u istraživanom području. [29,30]

Centralno-kompozitni plan pokusa je model pokusa 1. reda (2^k) proširen dodatnim točkama (stanjima pokusa) u centru i točkama u osima, kako bi se omogućila procjena parametara modela 2. reda. Centralno-kompozitni model pokusa sastoji se od 2^k stanja u vrhovima (faktorska stanja), $2k$ stanja u osima i stanja u centru pokusa (k - broj promatranih faktora). Centralno-kompozitni plan pokusa je alternativa $3k$ modelu u izgradnji modela pokusa 2. reda. Pri tome je broj izvođenja (faktorskih stanja) smanjen u usporedbi s potpunim faktorskim modelom pokusa. [30]

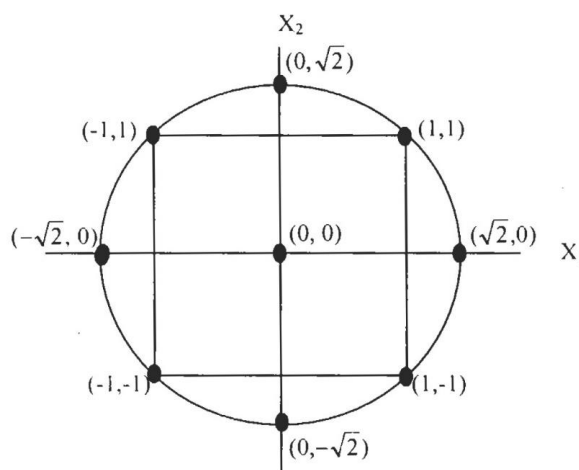
Za $k = 3$ (faktori su x_1 , x_2 i x_3), na slici 6.10, prikazan je model centralno-kompozitnog plana pokusa za koji je potrebno 15 stanja pokusa. U slučaju potpunog faktorskog plana pokusa (slika 6.11), bilo bi potrebno 27 stanja pokusa. [30]



Slika 6.10. Centralno-kompozitni plan pokusa s 3 faktora [30]

Slika 6.11. Potpuni faktorski plan pokusa 3^k [30]

Slika 6.12 prikazuje model centralno-kompozitnog plana pokusa sa 2 faktora (x_1 , x_2) za koji je potrebno 13 stanja pokusa.



Slika 6.12. Centralno-kompozitni plan pokusa s 2 faktora [31]

Poželjna karakteristika svakog pokusa je međusobna nezavisnost procjena glavnih faktora i njihovih interakcija, što se postiže ortogonalnošću i rotatabilnošću pokusa. Pokus je ortogonalan ukoliko je zbroj produkata kodiranih stanja bilo koje dvije kolone u matrici pokusa jednaka nuli. Rotatabilnost centralno-kompozitnog pokusa postiže se dodavanjem stanja pokusa tako da su sva stanja jednako udaljena od centra pokusa, odnosno rotatabilnost ovisi o tzv. osnoj udaljenosti α (udaljenost stanja pokusa u osima od centra pokusa). [32]

Pokus je rotabilan ukoliko je [33]:

$$\alpha = \sqrt[4]{F_s} \quad (6.1)$$

gdje je F_s - broj faktorskih stanja ($F_s = 2^k$ u slučaju potpunog faktorskog pokusa). [33]

U tablici 6.3 navedene su vrijednosti α za rotabilni centralno-kompozitni pokus.

Tablica 6.3. Vrijednosti osne udaljenosti α [29]

Broj faktora k	Broj faktorskih stanja F_s	Broj ukupnih stanja pokusa N	Osna udaljenost α
2	4	$8 + n_c^*$	1,414
3	8	$14 + n_c$	1,682
4	16	$24 + n_c$	2,000
5	32	$32 + n_c$	2,378

* n_c – broj stanja u centru pokusa

Dodatna stanja u centru pokusa služe kako bi se moglo usporediti vrijednosti mjerenja zavisne varijable u centru pokusa s aritmetičkom sredinom za ostatak pokusa. Ukoliko je aritmetička sredina centra pokusa signifikantno različita od ukupne aritmetičke sredine svih ostalih stanja pokusa, tada se može zaključiti da veza između faktora pokusa i zavisne varijable nije linearna. [29]

Ukoliko se pokus barem djelomično ponavlja, moguće je procijeniti grešku pokusa iz varijabilnosti ponovljenih stanja. Kako se ta stanja izvode pod identičnim uvjetima, odnosno identičnim razinama faktora, procjena greške pokusa iz tih podataka nezavisna je o tome je li model pokusa linearan ili nelinearan, te sadrži li interakcije višeg reda. Tako procijenjena greška pokusa predstavlja čistu grešku (e. *pure error*), odnosno ona je posljedica samo nepouzdanosti mjerenja zavisne varijable. [29,32]

Polinom II. stupnja kojim se opisuje proces (odzivna funkcija) za općeniti slučaj glasi [32]:

$$\hat{Y} = b_0 + b_1x_1 + \dots + b_kx_k + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + \dots + b_{k-1}x_{k-1}x_k + b_{11}x_1^2 + \dots + b_{kk}x_k^2 \quad (6.2)$$

Pri tome se koeficijenti b_0, \dots, b_k određuju s pomoću metode minimalne sume kvadrata odstupanja računskih od stvarnih vrijednosti. [32]

6.5. PRETPOKUS – ODREĐIVANJE MAKSIMALNOG VREMENA TRAJANJA NAKNADNOG TLAKA

U pretpokusu je bilo potrebno odrediti maksimalno vrijeme trajanja naknadnog tlaka, odnosno vrijeme trajanja naknadnog tlaka nakon kojeg više nema utjecaja na svojstva ispitnih tijela.

6.5.1. PROVEDBA PRETPOKUSA – ODREĐIVANJE MAKSIMALNOG VREMENA TRAJANJA NAKNADNOG TLAKA

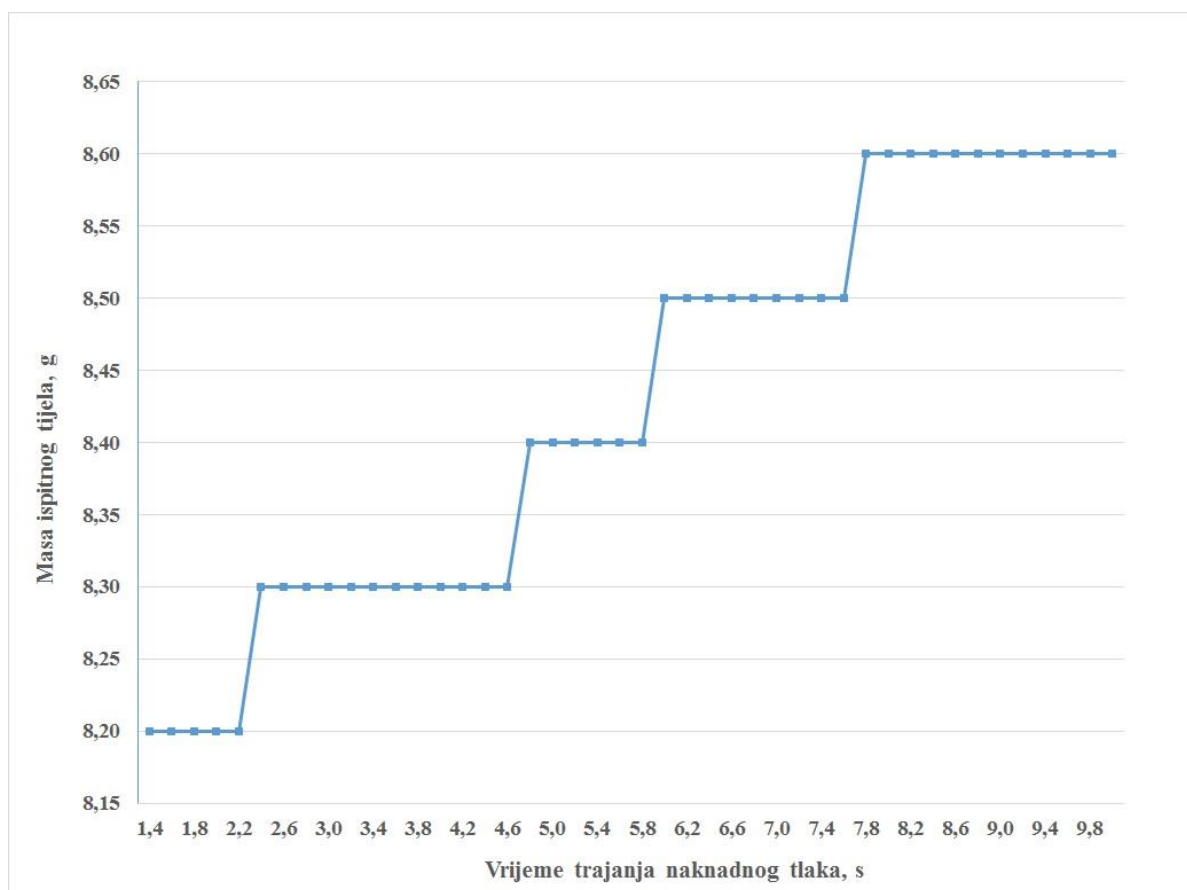
Uz konstantne parametre preradbe povećavano je vrijeme trajanja naknadnog tlaka od minimuma za 0,2 s. Konstantni parametri preradbe dani su u tablici 6.4, a izabrani su prema iskustvu i preporuci proizvođača materijala. Odmah nakon injekcijskog prešanja, ispitna tijela su vagana na digitalnoj vagi kako bi se uvidjelo kada masa postaje konstantna, odnosno kada vrijeme naknadnog tlaka prestaje imati utjecaj.

Tablica 6.4. Konstantni parametri preradbe pretpokusa – određivanje maksimalnog vremena trajanja naknadnog tlaka

Parametar	Jedinica	Vrijednost
Temperatura medija za temperiranje	°C	45
Temperatura taljevine	°C	210-220-230-220
Tlak ubrizgavanja	bar	190
Hidraulički tlak u jedinici za ubrizgavanje	bar	160
Visina naknadnog tlaka	bar	22
Brzina ubrizgavanja	%	80
Vrijeme ubrizgavanja	s	1,1
Vrijeme hlađenja otpreska	s	15

6.5.2. REZULTATI PRETPOKUSA – ODREĐIVANJE MAKSIMALNOG VREMENA TRAJANJA NAKNADNOG TLAKA

Rezultati pretpokusa određivanja maksimalnog vremena trajanja naknadnog tlaka prikazani su u tablici 9.1 u prilogu i na slici 6.13. Masa ispitka ustalila se nakon 7,8 s i iznosila je 8,6 g.



Slika 6.13. Rezultati pretpokusa - određivanje maksimalnog vremena trajanja naknadnog tlaka

6.6. PRETPOKUS - ODREĐIVANJE NAJUTJECAJNIJIH PARAMETARA INJEKCIJSKOG PREŠANJA NA RASTEZNU ČVRSTOĆU LINIJE SPAJANJA ISPITNIH TIJELA

U pretpokusu je bilo potrebno, između pet parametara injekcijskog prešanja, odrediti dva najutjecajnija na rasteznu čvrstoću linije spajanja ispitnih tijela.

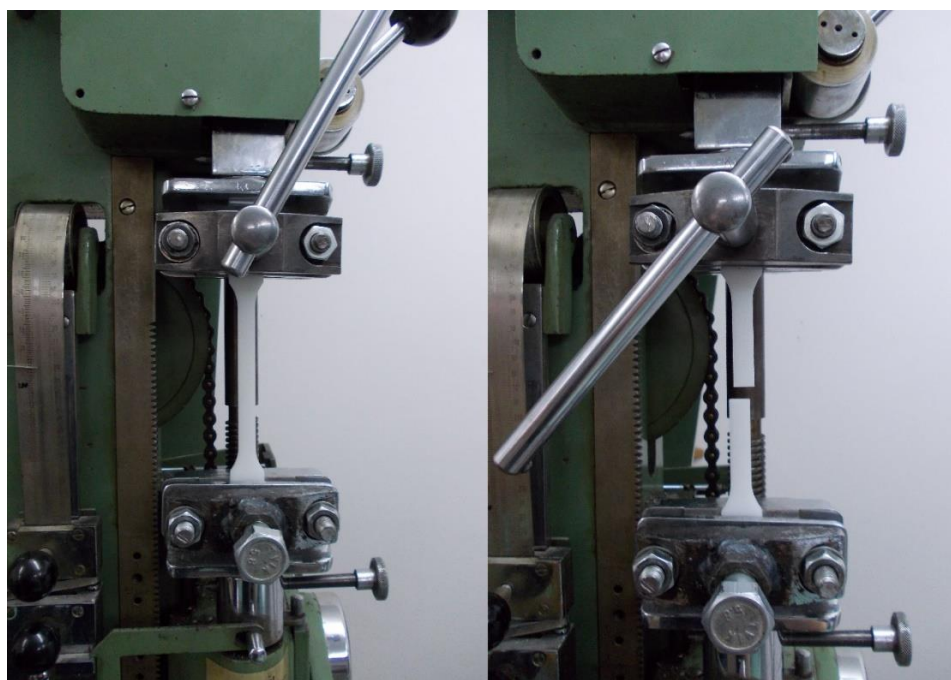
6.6.1. PROVEDBA PRETPOKUSA - ODREĐIVANJE NAJUTJECAJNIJIH PARAMETARA INJEKCIJSKOG PREŠANJA NA RASTEZNU ČVRSTOĆU LINIJE SPAJANJA ISPITNIH TIJELA

Pretpokus je proveden prema djelomičnom faktorskom planu pokusa na dvije razine s pet faktora. Konstantni parametri preradbe imaju iste vrijednosti kao u pretpokusu određivanja maksimalnog vremena trajanja naknadnog tlaka te su prikazani u tablici 6.5. Promjenjivi parametri su visina naknadnog tlaka, temperatura taljevine, temperatura medija za temperiranje, vrijeme ubrizgavanja te vrijeme naknadnog tlaka. Temperatura okoline bila je približno 25 °C. Pretpokus se izvodio statistički slučajno, prema tablici slučajnih brojeva. Bilo je potrebno provesti 19 stanja pretpokusa, te su za svako stanje injekcijski prešana po tri ispitna tijela. Nakon injekcijskog prešanja izmjerena

je širina i debljina linije spajanja ispitka pomoću digitalne pomične mjerke te izračunata njezina površina. Zatim su ispitna tijela postavljena u univerzalnu kidalicu gdje je ispitana rastezna čvrstoća linije spajanja (slika 6.14). Korištena je minimalna brzina kidanja od 7 mm/min te je sila potrebna za kidanje očitana iz mjernog područja "A" koje mjeri od 0 do 950 N. Dijeljenjem sile potrebne za kidanje ispitnog tijela sa površinom linije spajanja dobivene su vrijednosti rastezne čvrstoće.

Tablica 6.5. Konstantni parametri preradbe pretpokusa - određivanje najutjecajnijih parametara injekcijskog prešanja na rasteznu čvrstoću linije spajanja ispitnih tijela

Parametar	Jedinica	Vrijednost
Tlak ubrizgavanja	bar	190
Hidraulički tlak u jedinici za ubrizgavanje	bar	160
Brzina ubrizgavanja	%	80
Vrijeme hlađenja otpreska	s	15



Slika 6.14. Ispitivanje rastezne čvrstoće linije spajanja na univerzalnoj kidalici

6.6.2. REZULTATI PRETPOKUSA – ODREĐIVANJE NAJUTJECAJNIJIH PARAMETARA INJEKCIJSKOG PREŠANJA NA RASTEZNU ČVRSTOĆU LINIJE SPAJANJA ISPITNIH TIJELA

U prilogu u tablicama 9.2 i 9.3 navedene su sve vrijednosti dobivene pretpokusom. Izračunate i srednje vrijednosti promatranih svojstva prikazane su u tablici 6.6.

Tablica 6.6. Rezultati pretpokusa - određivanje najutjecajnijih parametara injekcijskog prešanja na rasteznu čvrstoću linije spajanja ispitnih tijela - srednje i izračunate vrijednosti

Redoslijed izvođenja	Stanje	Visina naknadnog tlaka, bar	Temperatura taljevine, °C	Temperatura medija za temperiranje, °C	Vrijeme ubrizgavanja, s	Vrijeme naknadnog tlaka, s	Širina, mm	Debljina, mm	Površina, mm ²	Sila, N	Rastezna čvrstoća, N/mm ²
1	3	20	260	10	1,0	1,0	9,68	3,81	36,88	507	13,75
2	16	60	260	40	1,4	8,0	9,88	3,84	37,94	517	13,63
3	13	20	200	40	1,4	8,0	9,83	3,86	37,94	648	17,08
4	5	20	200	40	1,0	1,0	9,62	3,74	35,98	570	15,84
5	12	60	260	10	1,4	1,0	9,83	3,60	35,39	432	12,21
6	11	20	260	10	1,4	8,0	9,83	3,85	37,85	531	14,03
7	1	20	200	10	1,0	8,0	9,82	3,89	38,20	660	17,28
8	15	20	260	40	1,4	1,0	9,76	3,82	37,28	184	4,94
9	6	60	200	40	1,0	8,0	9,88	3,87	38,24	641	16,76
10	14	60	200	40	1,4	1,0	9,82	3,45	33,88	561	16,56
11	10	60	200	10	1,4	8,0	9,92	3,92	38,89	639	16,43
12	2	60	200	10	1,0	1,0	9,83	3,55	34,90	571	16,36
13	4	60	260	10	1,0	8,0	9,90	3,85	38,12	553	14,51
14	7	20	260	40	1,0	8,0	9,79	3,81	37,30	522	13,99
15	8	60	260	40	1,0	1,0	9,77	3,75	36,64	179	4,89
16	17	40	230	25	1,2	4,5	9,85	3,73	36,74	607	16,52
17	18	40	230	25	1,2	4,5	9,85	3,72	36,64	607	16,57
18	9	20	200	10	1,4	1,0	9,78	3,81	37,26	583	15,65
19	19	40	230	25	1,2	4,5	9,85	3,72	36,64	610	16,65

6.6.3. ANALIZA PRETPOKUSA - ODREĐIVANJE NAJUTJECAJNIJIH PARAMETARA INJEKCIJSKOG PREŠANJA NA RASTEZNU ČVRSTOĆU LINIJE SAPAJANJA ISPITNIH TIJELA

U tablici 6.7 prikazani su rezultati obrade utjecaja parametara na rasteznu čvrstoću u programskom paketu *Design Expert* modulom ANOVA (analiza varijance).

Tablica 6.7. Rezultati analize varijance - utjecaj parametara na rasteznu čvrstoću u pretpokusu

	Suma kvadrata odstupanja	Stupnjevi slobode	Srednji kvadrat odstupanja	Varijabla F	Rizik odbacivanja hipoteze H_0
Model	204,531	12	17,044	5,255	0,039
x₁	0,092	1	0,092	0,028	0,873
x₂	100,050	1	100,050	30,850	$26 \cdot 10^{-4}$
x₃	17,078	1	17,078	5,266	0,070
x₄	0,508	1	0,508	0,157	0,709
x₅	34,545	1	34,545	10,652	0,022
x₁ · x₂	0,187	1	0,187	0,058	0,820
x₁ · x₅	0,050	1	0,050	0,015	0,907
x₂ · x₃	19,294	1	19,294	5,949	0,059
x₂ · x₄	0,205	1	0,205	0,063	0,812
x₂ · x₅	18,555	1	18,555	5,721	0,062
x₃ · x₅	13,969	1	13,969	4,307	0,093
x₄ · x₅	$76 \cdot 10^{-5}$	1	$76 \cdot 10^{-5}$	$23 \cdot 10^{-5}$	0,988
Zakrivljenost	16,890	1	16,890	5,208	0,071
Ostatak	16,216	5	3,243		
Odstupanje od modela	16,207	3	5,402	1256,362	$8 \cdot 10^{-4}$
Pogreška	$86 \cdot 10^{-4}$	2	$43 \cdot 10^{-4}$		
Ukupno	237,637	18			

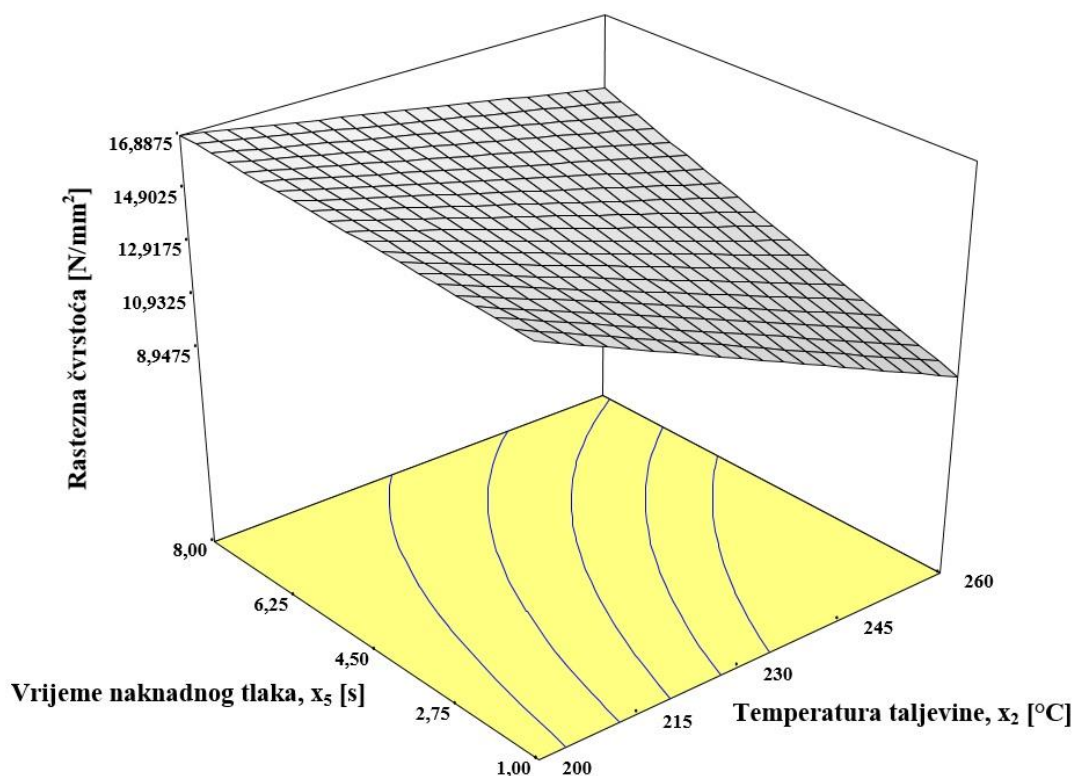
U tablici 6.8 prikazani su osnovni statistički podaci o modelu.

Tablica 6.8. Pregled statističkih podataka o modelu - utjecaj parametara na rasteznu čvrstoću u pretpokusu

Standardno odstupanje	1,8
Aritmetička sredina	14,4
Koeficijent determiniranosti	12,5

Koeficijent determiniranosti je mjera odstupanja od aritmetičke sredine koja je objašnjena modelom. Što je vrijednost koeficijenta determiniranosti bliža 1, model bolje slijedi podatke, odnosno pojava je bolje objašnjena. [34]

Analizom podataka dobivenih pretpokusom zaključeno je da su temperatura taljevine te vrijeme naknadnog tlaka dva najutjecajnija parametra injekcijskog prešanja na rasteznu čvrstoću linije spajanja ispitnih tijela. Njihov utjecaj na rasteznu čvrstoću u pretpokusu prikazuje slika 6.15. Iz slike se može vidjeti da je rastezna čvrstoća veća u slučaju niže temperature taljevine i duljeg vremena trajanja naknadnog tlaka, odnosno da je manja u slučaju više temperature taljevine te kraćeg vremena trajanja naknadnog tlaka.



Slika 6.15. Ovisnost rastezne čvrstoće o temperaturi taljevine i vremenu naknadnog tlaka u pretpokusu

6.7. POKUS – UTJECAJ TEMPERATURE TALJEVINE I VREMENA NAKNADNOG TLAKA NA RASTEZNU ČVRSTOĆU LINIJE SPAJANJA ISPITNIH TIJELA

U pokusu je bilo potrebno proučiti kakav utjecaj imaju temperatura taljevine i vrijeme naknadnog tlaka, kao dva najutjecajnijih parametra injekcijskog prešanja, na rasteznu čvrstoću linije spajanja ispitnih tijela

6.7.1. PROVEDBA POKUSA – UTJECAJ TEMPERATURE TALJEVINE I VREMENA NAKNADNOG TLAKA NA RASTEZNU ČVRSTOĆU LINIJE SAPAJANJA ISPITNIH TIJELA

Pokus je proveden prema centralno-kompozitnom planu pokusa na pet razina s dva faktora. Konstantni parametri poput tlaka ubrizgavanja, hidrauličkog tlaka u jedinici za ubrizgavanje, brzine ubrizgavanja te vremena hlađenja otpreska su ostali isti kao u prethodnim pretpokusima, dok su za parametre poput visine naknadnog tlaka, temperature medija za temperiranje te vremena ubrizgavanja uzete optimalne vrijednosti za dobivanje najviše rastezne čvrstoće (tablica 6.9). Promjenjivi parametri su temperatura taljevine i vrijeme naknadnog tlaka. Provedeno je 13 stanja pokusa, statistički slučajnim redoslijedom prema tablici slučajnih brojeva. Za svako stanje pokusa injekcijski je prešano pet ispitnih tijela. Nakon injekcijskog prešanja uslijedilo je mjerenje debljine i širine linije spajanja ispitnog tijela te računanje njegove površine. Zatim je ispitana rastezna čvrstoća linije spajanja pomoću univerzalne kidalice. Brzina kidanja je bila jednaka kao u pretpokusu. Vrijednosti rastezne čvrstoće su dobivene djeljenjem sile potrebne za kidanje ispitnog tijela sa površinom linije spajanja.

Tablica 6.9. Konstantni parametri preradbe pokusa - utjecaj temperature taljevine i vremena naknadnog tlaka na rasteznu čvrstoću linije spajanja ispitnih tijela

Parametar	Jedinica	Vrijednost
Temperatura medija za temperiranje	°C	39
Tlak ubrizgavanja	bar	190
Hidraulički tlak u jedinici za ubrizgavanje	bar	160
Visina naknadnog tlaka	bar	52,5
Brzina ubrizgavanja	%	80
Vrijeme ubrizgavanja	s	1,4
Vrijeme hlađenja otpreska	s	15

6.7.2. REZULTATI POKUSA – UTJECAJ TEMPERATURE TALJEVINE I VREMENA NAKNADNOG TLAKA NA RASTEZNU ČVRSTOĆU LINIJE SAPAJANJA ISPITNIH TIJELA

Sve vrijednosti dobivene pokusom prikazane su u prilogu u tablicama 9.4 i 9.5, dok su izračunate i srednje vrijednosti promatranih svojstva prikazane u tablici 6.10.

Tablica 6.10. Rezultati pokusa - utjecaj temperature taljevine i vremena naknadnog tlaka na rasteznu čvrstoću linije spajanja ispitnih tijela - srednje i izračunate vrijednosti

Redoslijed izvođenja	Stanje	Temperatura taljevine, °C	Vrijeme naknadnog tlaka, s	Širina, mm	Debljina, mm	Površina, mm ²	Sila, N	Rastezna čvrstoća, N/mm ²
1	7	230	1,0	9,80	3,61	35,38	606	17,13
2	6	272	4,5	9,88	3,68	36,36	258	7,10
3	11	230	4,5	9,86	3,77	37,17	621	16,71
4	9	230	4,5	9,86	3,77	37,17	622	16,73
5	5	188	4,5	9,88	3,83	37,84	640	16,91
6	4	260	7,0	9,88	3,79	37,45	317	8,47
7	2	260	2,0	9,83	3,57	35,09	333	9,49
8	3	200	7,0	9,88	3,89	38,43	656	17,07
9	10	230	4,5	9,86	3,76	37,07	629	16,97
10	8	230	8,0	9,88	3,85	38,04	644	16,93
11	13	230	4,5	9,87	3,77	37,21	624	16,77
12	1	200	2,0	9,84	3,73	36,70	617	16,81
13	12	230	4,5	9,87	3,76	37,11	618	16,65

6.7.3. ANALIZA POKUSA – UTJECAJ TEMPERATURE TALJEVINE I VREMENA NAKNADNOG TLAKA NA RASTEZNU ČVRSTOĆU LINIJE SPAJANJA ISPITNIH TIJELA

Rezultati obrade utjecaja temperature taljevine te vremena naknadnog tlaka na rasteznu čvrstoću u programskom paketu *Design Expert* modulom ANOVA (analiza varijance) prikazani su u tablici 6.11.

Tablica 6.11. Rezultati analize varijance - utjecaj parametara na rasteznu čvrstoću u pokusu

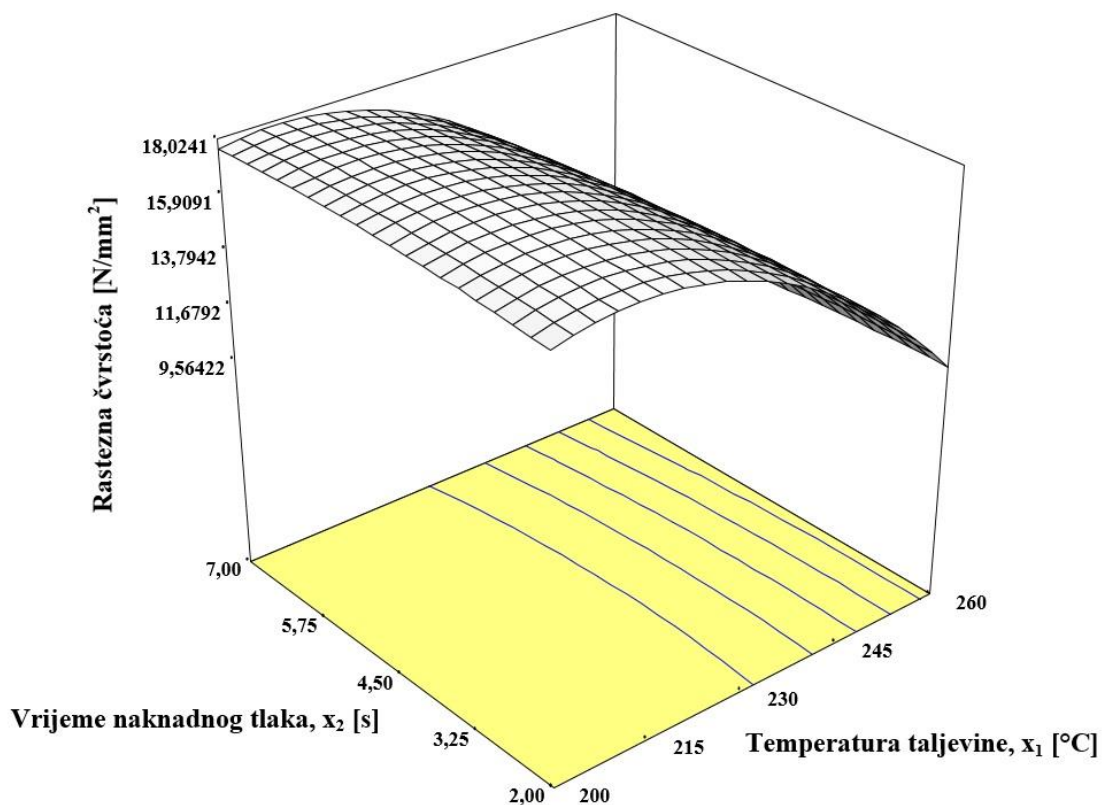
	Suma kvadrata odstupanja	Stupnjevi slobode	Srednji kvadrat odstupanja	Varijabla F	Rizik odbacivanja hipoteze H_0
Model	164,950	5	32,990	42,270	$< 10^{-4}$
x₁	110,956	1	110,956	142,169	$< 10^{-4}$
x₂	0,136	1	0,136	0,174	0,689
x₁²	53,372	1	53,372	68,386	$< 10^{-4}$
x₂²	0,461	1	0,461	0,590	0,467
x₁ · x₂	0,410	1	0,410	0,525	0,492
Ostatak	5,463	7	0,780		
Odstupanje od modela	5,404	3	1,801	121,049	$2 \cdot 10^{-4}$
Pogreška	0,060	4	0,015		
Ukupno	170,413	12			

U tablici 6.12 prikazani su osnovni statistički podaci o modelu.

Tablica 6.12. Pregled statističkih podataka o modelu - utjecaj parametara na rasteznu čvrstoću u pokusu

Standardno odstupanje	0,88
Aritmetička sredina	14,90
Koeficijent determiniranosti	5,93

Slika 6.16 prikazuje utjecaj temperature taljevine te vremena naknadnog tlaka na rasteznu čvrstoću linije spajanja ispitnih tijela. Iz nje možemo zaključiti da u pokusu vrijeme naknadnog tlaka nije imalo značajan utjecaj na rasteznu čvrstoću. Također zaključujemo i da je pri nižoj temperaturi taljevine rastezna čvrstoća viša, odnosno niža pri višoj temperaturi taljevine.



Slika 6.16. Ovisnost rastezne čvrstoće o temperaturi taljevine i vremenu naknadnog tlaka u pokusu

Kodirana jednadžba za izračunavanje predviđanja mase:

$$y = 16,77 - 3,72 \cdot x_1 - 0,13 \cdot x_2 - 2,77 \cdot x_1^2 - 0,26 \cdot x_2^2 - 0,32 \cdot x_1 \cdot x_2 \quad (6.3)$$

Jednadžba za izračunavanje mase sa stvarnim faktorima:

$$y = -122,504 + 1,311 \cdot x_1 + 1,3 \cdot x_2 - 3,078 \cdot 10^{-3} \cdot x_1^2 - 0,041 \cdot x_2^2 - 4,267 \cdot 10^{-3} \cdot x_1 \cdot x_2 \quad (6.4)$$

6.8. RASPRAVA O DOBIVENIM REZULTATIMA

Pretpokusom je ustanovljeno da maksimalno vrijeme trajanja naknadnog tlaka iznosi 7,8 s, te da pri njemu ispitno tijelo teži 8,6 g. Takav rezultat bio je očekivan na temelju svojstva polipropilena, vrijednostima konstantnih parametara preradbe te dimenzija ulijevnog kanala i ušća. Nakon što je ustanovljeno maksimalno vrijeme trajanja naknadnog tlaka, odabran je interval trajanja pri kojem ono ima utjecaj na svojstva ispitnog tijela.

Pretpokus određivanja najutjecajnijih parametara imao je pet promjenjivih parametara. Izvedbom pretpokusa prema djelomičnom faktorskom planu pokusa, te analizom dobivenih podataka, zaključeno je da su temperatura taljevine i vrijeme naknadnog tlaka dva najutjecajnija parametara na rasteznu čvrstoću linije spajanja.

Mijenjajući ta dva parametara prema centralno-kompozitnom planu pokusa, te analizom dobivenih rezultata, doneseni su zaključci o njihovom utjecaju na rasteznu čvrstoću. Porastom temperature taljevine, rastezna čvrstoća se smanjuje, odnosno s manjom temperaturom taljevine, rastezna čvrstoća je veća. Dok je u pretpokusu dulje vrijeme trajanja naknadnog tlaka povećavalo rasteznu čvrstoću, odnosno kraće vrijeme trajanja naknadnog tlaka smanjivalo rasteznu čvrstoću, u pokusu nije imalo značajnog utjecaja.

Ovakvi rezultati su pomalo neočekivani. Mogući razlozi ovakvih rezultata leže u rasponu temperature taljevine, koji je odabran prema preporuci proizvođača materijala, dok bi prema iskustvu ipak bio niži. Također moguće je da manjak utjecaja vremena naknadnog tlaka na rasteznu čvrstoću u pokusu je posljedica optimalnih vrijednosti nekih od konstantnih parametara. Ponajviše zbog visokog iznosa naknadnog tlaka te duljeg vremena ubrizgavanja, što izravno smanjuje utjecaj vremena naknadnog tlaka. Te vrijednosti su odabrane prema programskom paketu *Design Expert*, no one odstupaju od iskustvenih vrijednosti.

7. ZAKLJUČAK

Polimerni materijali postali su neizostavan i bitan dio ljudskog života. Tehnološki napredak današnjice uvelike je povezan i sa razvojem polimera. Procesi preradbe polimera su dosegli visoku razinu, a kao predvodnik se ističe injekcijsko prešanje. Da bi se njegovi mnogobrojni parametri mogli regulirati na optimalnu razinu, potrebnu je shvatiti kako oni utječu na otpresak.

U okviru rada opsežno je opisan proces injekcijskog prešanja. Navedena je njegova definicija te od čega se sve sastoji linija za injekcijsko prešanje. Također su i opisani procesi injekcijskog prešanja plastomernih taljevina. Detaljno su obrađeni najvažniji parametri injekcijskog prešanja te opisano kako u teoriji utječu na svojstva otpreska. Posebna pažnja se pridodala kalupu i ispitnom tijelu prema ISO normama. Također su objašnjeni i kratkotrajni te dugotrajni postupci ispitivanja mehaničkih svojstava.

Eksperimentalni dio započet je pretpokusom određivanja maksimalnog vremena trajanja naknadnog tlaka. Za polimerni materijal odabran je polipropilen. Vrijeme trajanja naknadnog tlaka povećavano je od minimuma za 0,2 s. Zaključeno je da nakon 7,8 s naknadni tlak prestaje imati utjecaj na ispitno tijelo. Zatim se prema djelomičnom faktorskom planu pokusa proveo pretpokus određivanja najutjecajnijih parametara na rasteznu čvrstoću linije spajanja ispitnih tijela. Injekcijski su prešana ispitna tijela prema ISO normama te postavljena u univerzalnu kladalicu kako bi se ispitala njihova rastezna čvrstoća. Dobiveni podaci su obrađeni s pomoću programskog paketa *Design Expert*. Određeno je da su temperatura taljevine i vrijeme naknadnog tlaka dva najutjecajnija parametra na rasteznu čvrstoću. Mijenjajući ta dva parametra prema centralno-kompozitnom planu pokusa, napravljen je pokus kojem je cilj bio analizirati njihov utjecaj na rasteznu čvrstoću linije spajanja. Zaključeno je da viša temperatura taljevine smanjuje rasteznu čvrstoću, odnosno da je rastezna čvrstoća veća pri nižim temperaturama taljevine. U pretpokusu dulje vrijeme naknadnog tlaka povećava rasteznu čvrstoću, odnosno rastezna čvrstoća je manja pri kraćem vremenu naknadnog tlaka, dok u pokusu analizirani podaci ne pokazuju bitan utjecaj vremena naknadnog tlaka. Ovakvi neočekivani rezultati se mogu objasniti odabranim intervalom temperature taljevine prema preporuci proizvođača, dok bi iskustveno on bio nešto niži, te optimalnim vrijednostima nekih od parametara prema programskom paketu *Design Expert* koji izravno smanjuju utjecaj vremena naknadnog tlaka.

8. LITERATURA

- [1] Čatić, I.: *Proizvodnja polimernih tvorevina*, Društvo za plastiku i gumu, Zagreb, 2006.
- [2] Rogić, A., Čatić, I., Godec, D.: *Polimeri i polimerne tvorevine*, Društvo za plastiku i gumu, Zagreb, 2008.
- [3] Šercer, M., Čatić, I.: *Vođenje procesa injekcijskog prešanja plastomera*, Društvo plastičara i gumaraca, Zagreb, 1986.
- [4] Pötsch, G., Michaeli, W.: *Injection Molding*, Carl Hanser Verlag, München, 1995.
- [5] Johannaber, F.: *Injection Molding Machines*, Carl Hanser Verlag, München, 1994.
- [6] Wagner, M.: *Part dimensional consistency with different switchpoint controls techniques*, Conference Proceedings, ANTEC '94, San Francisco, 01.-05.05.1994., 716-720
- [7] Čatić, I.: *Izmjena topline u kalupima za injekcijsko prešanje plastomera*, Društvo plastičara i gumaraca, Zagreb, 1985.
- [8] Šercer, M.: *Reguliranje procesa injekcijskog prešanja od ciklusa do ciklusa*, Magistarski rad, Tehnološki fakultet, Zagreb, 1984.
- [9] Rogić, A.: *Optimiranje temperatura prerade u procesu injekcijskog prešanja plastomera*, Magistarski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 1987.
- [10] N.N.: *Upute za uporabu računalnog programa Moldex 3D*, CoreTech Systems, 2004.
- [11] N.N.: *Upute za uporabu računalnog programa Moldflow Plastics Inside*, Moldflow, 2004.
- [12] Garvey, E.B.: *On-line Quality Control of Injection Molding Using Neural Networks*, M.Sc. Thesis, Royal Melbourne Institute of Technology, Melbourne, 1997.
- [13] Gao, F., Koresawa, H., Narahara, H., Suzuki, H.: *Evaluation of thermal environment in plastic injection mold*, ANTEC 2001, Conference Proceedings, Society of Plastics Engineers, Atlanta, 6.-10.5.2001., 969-973.
- [14] Čatić, I., Johannaber, F.: *Injekcijsko prešanje polimera i ostalih materijala*, Društvo za plastiku i gumu, Zagreb, 2004.
- [15] ISO 294 – 1: 1996
- [16] Godec, D., Čatić, I., Perković D.: *Simulation Application in Mould Development for Injection Moulding of Polymers*, Strojarski fakultet u Mostaru, Mostar, 1997.
- [17] Raos, P.: *Sistemski pristup konstruiranju kalupa za injekcijsko prešanje duomera*, Fakultet strojarstva i brodogradnje u Zagrebu, Zagreb, 1986.
- [18] Godec, D., Šercer, M.: *Computer Support in Fabricating Mould for Injection Moulding in Small and Medium Toolshops*, Hrvatska udruga proizvodnog strojarstva, Opatija, 1999.
- [19] ISO 527 – 2: 1993.

- [20] Brown, R.: *Handbook of Polymer Testing*, Short-Term Mechanical Tests, Rapra Technology Limited, United Kingdom, 2002.
- [21] Raos, P., Čatić, I.: *Razvoj injekcijski prešanih polimernih tvorevina*, Društvo plastičara i gumaraca, Zagreb, 1991.
- [22] Collins, C.: *Monitoring cavity pressure perfects injection molding*, Assembly Automation, 19(1999)3, 197-202.
- [23] Erceg, M., Kurte, L., Kursan, M.: *Utjecaj recikliranja na toplinska svojstva i kinetiku toplinske razgradnje polipropilena*, Polimeri, 32(2011)2, 74-80.
- [24] *Fluoropolymers Selection For Corrosive Media Applications*, <http://www.anticopumps.co.in/blog/?p=113>, 19.12.2014.
- [25] *Material Data Center Datasheets*, <http://www.materialdatacenter.com/ms/en/Sabic/Saudi+Basic+Industries+Corp+%28Sabic%29/SABIC%C2%AE+PP+CX03-81/30390e56/2171>, 24.12.2014.
- [26] *Formplast Plastic Machinery*, http://www.formplastgmbh.com/en/injection_moulding_machine.php?archiv=1&ARBURG&maschinen_id=592, 24.12.2014.
- [27] Siveri, J.: *Optimiranje procesa proizvodnje enzima EVOP metodom*, Diplomski rad, Fakultet kemijskoj inženjerstva i tehnologije, Zagreb, 2006.
- [28] Topalušić, M.: *Šest sigma metodologija i planiranje pokusa*, Diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2014.
- [29] Šakić, N.: *Metode znanstveno-istraživačkog rada*, predavanja na poslijediplomskom studiju, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 1996.
- [30] Rujnić-Sokele, M.: *Optimiranje procesa proizvodnje puhanih proizvoda od poli(etilentereftalata)*, Magistarski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2002.
- [31] Akram, M.: *Central composite design robust to three missing observations*, Doktorski rad, The Islamia University, Bahawalpur, 2002.
- [32] N.N.: *Prospektni materijal tvrtke Metalka*, 1988.
- [33] Del Vecchio, R.J.: *Understanding Design of Experiments*, Carl Hanser Verlag, München, 1997.
- [34] Rujnić-Sokele, M.: *Utjecaj parametara razvlačenja puhanja na svojstva PET boca*, Polimeri 28(2007)4; 225-233.

9. PRILOZI

I. CD-R disc

II. Tablica 9.1. Rezultati pretpokusa - određivanje maksimalnog vremena trajanja naknadnog tlaka

Vrijeme trajanja naknadnog tlaka, s	Masa ispitnog tijela, g
1,4	8,2
1,6	8,2
1,8	8,2
2,0	8,2
2,2	8,2
2,4	8,3
2,6	8,3
2,8	8,3
3,0	8,3
3,2	8,3
3,4	8,3
3,6	8,3
3,8	8,3
4,0	8,3
4,2	8,3
4,4	8,3
4,6	8,3
4,8	8,4
5,0	8,4
5,2	8,4
5,4	8,4
5,6	8,4
5,8	8,4
6,0	8,5
6,2	8,5
6,4	8,5
6,6	8,5
6,8	8,5
7,0	8,5
7,2	8,5
7,4	8,5
7,6	8,5
7,8	8,6
8,0	8,6
8,2	8,6

III. Tablica 9.2. Rezultati pretpokusa - određivanje najutjecajnijih parametara injekcijskog prešanja na rasteznu čvrstoću linije spajanja ispitnih tijela -

I. dio

Redoslijed izvođenja	Stanje	Visina naknadnog tlaka, bar	Temperatura taljevine, °C	Temperatura medija za temperiranje, °C	Vrijeme ubrizgavanja, s	Vrijeme naknadnog tlaka, s	Broj	Širina, mm	Debljina, mm	Površina, mm ²	Sila, N	Rastezna čvrstoća, N/mm ²
1	3	20	260	10	1,0	1,0	3.1.	9,69	3,81	36,92	510	13,81
							3.2.	9,69	3,81	36,92	502	13,60
							3.3.	9,67	3,80	36,75	510	13,88
2	16	60	260	40	1,4	8,0	16.1.	9,88	3,85	38,04	564	14,83
							16.2.	9,89	3,83	37,88	506	13,36
							16.3.	9,87	3,83	37,80	480	12,70
3	13	20	200	40	1,4	8,0	13.1.	9,82	3,87	38,00	648	17,05
							13.2.	9,83	3,86	37,94	650	17,13
							13.3.	9,83	3,86	37,94	646	17,03
4	5	20	200	40	1,0	1,0	5.1.	9,63	3,74	36,02	568	15,77
							5.2.	9,60	3,74	35,90	572	15,93
							5.3.	9,63	3,74	36,02	570	15,83
5	12	60	260	10	1,4	1,0	12.1.	9,88	3,59	35,47	446	12,57
							12.2.	9,82	3,69	36,24	408	11,26
							12.3.	9,80	3,52	34,50	442	12,81
6	11	20	260	10	1,4	8,0	11.1.	9,84	3,85	37,88	530	13,99
							11.2.	9,83	3,85	37,85	532	14,06
							11.3.	9,83	3,86	37,94	532	14,02
7	1	20	200	10	1,0	8,0	1.1.	9,83	3,89	38,24	675	17,65
							1.2.	9,82	3,88	38,10	654	17,16
							1.3.	9,82	3,89	38,20	650	17,02
8	15	20	260	40	1,4	1,0	15.1.	9,75	3,83	37,34	160	4,28
							15.2.	9,76	3,78	36,89	194	5,26
							15.3.	9,78	3,85	37,65	198	5,26
9	6	60	200	40	1,0	8,0	6.1.	9,89	3,86	38,18	638	16,71
							6.2.	9,88	3,86	38,14	642	16,83
							6.3.	9,88	3,90	38,53	644	16,71
10	14	60	200	40	1,4	1,0	14.1.	9,81	3,48	34,14	560	16,40
							14.2.	9,82	3,44	33,78	562	16,64
							14.3.	9,83	3,42	33,62	560	16,66

IV. Tablica 9.3. Rezultati pretpokusa - određivanje najutjecajnijih parametara injekcijskog prešanja na rasteznu čvrstoću linije spajanja ispitnih tijela - II. dio

Redoslijed izvođenja	Stanje	Visina naknadnog tlaka, bar	Temperatura taljevine, °C	Temperatura medija za temperiranje, °C	Vrijeme ubrizgavanja, s	Vrijeme naknadnog tlaka, s	Broj	Širina, mm	Debljina, mm	Površina, mm ²	Sila, N	Rastezna čvrstoća, N/mm ²
11	10	60	200	10	1,4	8,0	10.1.	9,91	3,90	38,65	640	16,56
							10.2.	9,92	3,96	39,28	634	16,14
							10.3.	9,92	3,90	38,69	642	16,59
12	2	60	200	10	1,0	1,0	2.1.	9,83	3,56	34,99	574	16,40
							2.2.	9,82	3,55	34,86	568	16,29
							2.3.	9,83	3,55	34,90	570	16,33
13	4	60	260	10	1,0	8,0	4.1.	9,91	3,85	38,15	570	14,94
							4.2.	9,89	3,85	38,08	556	14,60
							4.3.	9,90	3,84	38,02	532	13,99
14	7	20	260	40	1,0	8,0	7.1.	9,79	3,82	37,40	522	13,96
							7.2.	9,80	3,81	37,34	524	14,03
							7.3.	9,79	3,81	37,30	520	13,94
15	8	60	260	40	1,0	1,0	8.1.	9,75	3,82	37,25	142	3,81
							8.2.	9,81	3,71	36,40	216	5,93
							8.3.	9,74	3,72	36,23	178	4,91
16	17	40	230	25	1,2	4,5	17.1.	9,85	3,73	36,74	606	16,49
							17.2.	9,85	3,73	36,74	612	16,66
							17.3.	9,86	3,73	36,78	602	16,37
17	18	40	230	25	1,2	4,5	18.1.	9,85	3,73	36,74	606	16,49
							18.2.	9,85	3,72	36,64	608	16,59
							18.3.	9,85	3,72	36,64	606	16,54
18	9	20	200	10	1,4	1,0	9.1.	9,78	3,78	36,97	560	15,15
							9.2.	9,78	3,80	37,16	588	15,82
							9.3.	9,78	3,84	37,56	602	16,03
19	19	40	230	25	1,2	4,5	19.1.	9,84	3,72	36,60	606	16,56
							19.2.	9,85	3,72	36,64	612	16,70
							19.3.	9,85	3,72	36,64	612	16,70

V. Tablica 9.4. Rezultati pokusa - utjecaj temperature taljevine i vremena naknadnog tlaka na rasteznu čvrstoću linije spajanja ispitnih tijela - I. dio

Redoslijed izvođenja	Stanje	Temperatura taljevine, °C	Vrijeme naknadnog tlaka, s	Broj	Širina, mm	Debljina, mm	Površina, mm ²	Sila, N	Rastezna čvrstoća, N/mm ²
1	7	230	1,0	7.1.	9,82	3,59	35,25	614	17,42
				7.2.	9,81	3,64	35,71	606	16,97
				7.3.	9,76	3,59	35,04	604	17,24
				7.4.	9,82	3,61	35,45	600	16,93
				7.5.	9,79	3,60	35,24	604	17,14
2	6	272	4,5	6.1.	9,88	3,68	36,36	250	6,88
				6.2.	9,87	3,68	36,32	272	7,49
				6.3.	9,88	3,68	36,36	266	7,32
				6.4.	9,87	3,67	36,22	254	7,01
				6.5.	9,88	3,68	36,36	250	6,88
3	11	230	4,5	11.1.	9,86	3,77	37,17	620	16,68
				11.2.	9,86	3,77	37,17	628	16,89
				11.3.	9,86	3,77	37,17	622	16,73
				11.4.	9,86	3,77	37,17	616	16,57
				11.5.	9,86	3,77	37,17	620	16,68
4	9	230	4,5	9.1.	9,86	3,77	37,17	624	16,79
				9.2.	9,86	3,76	37,07	624	16,83
				9.3.	9,85	3,77	37,13	628	16,91
				9.4.	9,87	3,76	37,11	614	16,54
				9.5.	9,87	3,77	37,21	622	16,72
5	5	188	4,5	5.1.	9,89	3,83	37,88	640	16,90
				5.2.	9,88	3,83	37,84	636	16,81
				5.3.	9,89	3,83	37,88	642	16,95
				5.4.	9,88	3,82	37,74	644	17,06
				5.5.	9,87	3,83	37,80	638	16,88
6	4	260	7,0	4.1.	9,88	3,79	37,45	306	8,17
				4.2.	9,87	3,79	37,41	320	8,55
				4.3.	9,89	3,79	37,48	328	8,75
				4.4.	9,88	3,80	37,54	328	8,74
				4.5.	9,88	3,79	37,45	304	8,12
7	2	260	2,0	2.1.	9,84	3,57	35,13	450	12,81
				2.2.	9,83	3,57	35,09	358	10,20
				2.3.	9,84	3,56	35,03	370	10,56
				2.4.	9,83	3,59	35,29	338	9,58
				2.5.	9,83	3,58	35,19	148	4,21

VI. Tablica 9.5. Rezultati pokusa - utjecaj temperature taljevine i vremena naknadnog tlaka na rasteznu čvrstoću linije spajanja ispitnih tijela - II. dio

Redoslijed izvođenja	Stanje	Temperatura taljevine, °C	Vrijeme naknadnog tlaka, s	Broj	Širina, mm	Debljina, mm	Površina, mm ²	Sila, N	Rastezna čvrstoća, N/mm ²
8	3	200	7,0	3.1.	9,89	3,93	38,87	656	16,88
				3.2.	9,89	3,91	38,67	656	16,96
				3.3.	9,88	3,88	38,33	656	17,11
				3.4.	9,89	3,88	38,37	652	16,99
				3.5.	9,87	3,87	38,20	658	17,23
9	10	230	4,5	10.1.	9,86	3,76	37,07	620	16,72
				10.2.	9,86	3,77	37,17	618	16,63
				10.3.	9,86	3,76	37,07	628	16,94
				10.4.	9,85	3,77	37,13	624	16,80
				10.5.	9,86	3,76	37,07	656	17,69
10	8	230	8,0	8.1.	9,88	3,85	38,04	642	16,88
				8.2.	9,87	3,86	38,10	644	16,90
				8.3.	9,88	3,86	38,14	650	17,04
				8.4.	9,87	3,85	38,00	642	16,89
				8.5.	9,89	3,85	38,08	640	16,81
11	13	230	4,5	13.1.	9,87	3,77	37,21	620	16,66
				13.2.	9,87	3,77	37,21	632	16,98
				13.3.	9,87	3,77	37,21	620	16,66
				13.4.	9,86	3,77	37,17	626	16,84
				13.5.	9,86	3,75	36,98	624	16,88
12	1	200	2,0	1.1.	9,83	3,74	36,76	616	16,76
				1.2.	9,85	3,73	36,74	612	16,66
				1.3.	9,85	3,74	36,84	626	16,99
				1.4.	9,85	3,74	36,84	622	16,88
				1.5.	9,84	3,72	36,60	610	16,66
13	12	230	4,5	12.1.	9,86	3,75	36,98	616	16,66
				12.2.	9,87	3,76	37,11	622	16,76
				12.3.	9,87	3,76	37,11	624	16,81
				12.4.	9,87	3,76	37,11	616	16,60
				12.5.	9,86	3,75	36,98	610	16,50